

# **Filosofía de la Biología Cognitiva.**

## **Enfoque biosemiótico de la cognición en organismos sin sistema nervioso:**

### **El caso de los Mixomicetos**

Autor: Òscar Castro Garcia

Director de tesis: Víctor Gómez Pin

Programa de doctorado en Filosofía

Departamento de Filosofía

Universidad Autònoma de Barcelona

2015

“Filosofía de la Biología Cognitiva. Enfoque biosemiótico de la cognición en organismos sin sistema nervioso. El caso de los Mixomicetos”

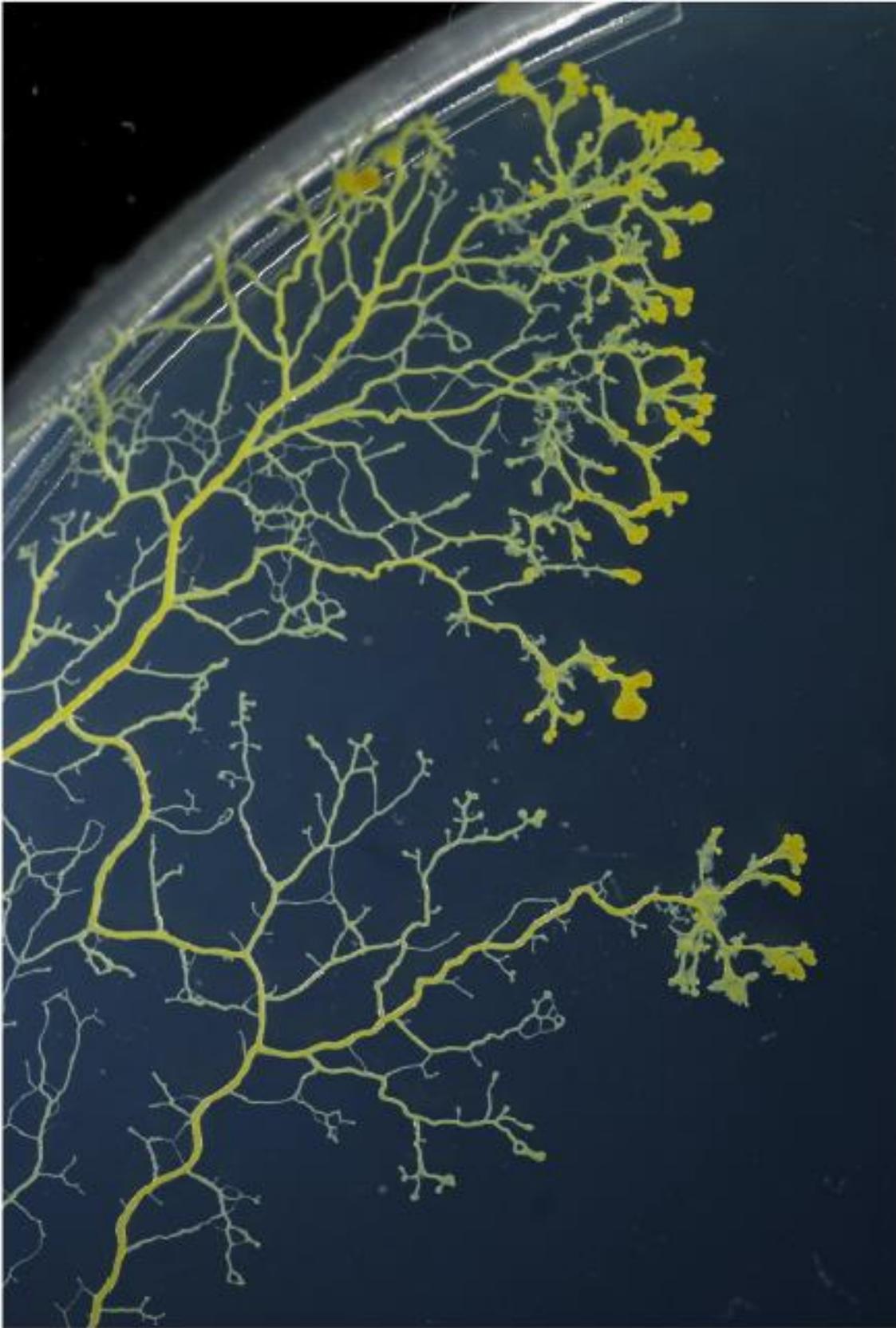


Fig 1. Primer plano de la red fractal del *Physarum polycephalum* en busca de alimento. El citoplasma transporta al organismo a través de las venas. Foto de Malcolm Ricketts.

Living systems are cognitive systems, and living as a process is a process of cognition. This statement is valid for all organisms, with or without a nervous system.

Los sistemas vivos son sistemas cognitivos y el proceso de vivir es un proceso de cognición. Esta afirmación es válida para todos los organismos, tengan o no sistema nervioso

Humberto Maturana<sup>1</sup>

I wish to emphasize instead the more universal ability of animals to cope continuously with the complex, dynamic, unpredictable world in which they are. To me, this penchant for **adaptive behavioris the essence of intelligence**: the ability of an autonomous agent to flexibly adjust its behavioral repertoire to the moment-to-moment contingencies which arise in its interaction with this environment.

En cambio, me gustaría hacer hincapié en la capacidad más universal de los animales para hacer frente de forma continua con el complejo, dinámico e impredecible mundo en el que se encuentran. Para mí, esta inclinación (predilección) por el **comportamiento adaptativo es la esencia de la inteligencia**: la capacidad de un agente autónomo para ajustar de forma flexible su repertorio de conductas a las contingencias, de instante a instante, en que surgen en su interacción con el medio ambiente.

Randall D. Beer<sup>2</sup>

(15) [Et] L'Action du principe interne qui fait le changement ou le passage d'une perception á une autre, peut être appellé APPETITION: il est vrai que l'appetit ne sçauroit toûjours parvenir entièrement á toute la perception, oùil tend, mais il en obtient toûjours quelque chose, et parvient á des perceptions nouvelles.

(15) Actio principii interni, qua sit mutatio seu transitus ab una perceptione ad alteram, appetitus appellari potest. Verum equidem est, quod appetitus non semper prorsus pervenire possit ad omnem perceptionem, ad quam tendit; semper tamen aliquid ejus obtinet atque ad novas perceptiones pervenit.

(15) La Acción del principio interno que produce el cambio o el paso de una percepción a otra puede llamarse *Apetición*\*. Si bien es cierto que el apetito no siempre puede acceder por entero a toda percepción a la que tiende, en cambio, siempre obtiene algo de ella y accede a nuevas percepciones.

(17) On est obligé d'ailleurs de confesser que la PERCEPTION et ce qui en depend est INEXPLICABLE PAR DES RAISONS MECANIKUES, c'est á diré, par les figures et par les mouvemens. Et feignant qu'il y ait une Machine, dont la structure fasse penser, sentir, avoir perception ; on pourra la concevoir aggrandie en conservant les memes proportions, en sorte qu'on y puisse entrer, comme dans un moulin. Et cela posé, on ne trouvera en la visitant au-dedans, que des piéces qui se poussent les unes les autres, et jamais de quoi expliquer une perception.

---

<sup>1</sup> Maturana, H. R. (1970) *Biology of Cognition*. Reimpreso en Maturana, H. R., Varela, F. J. (1980) *Autopoiesis: The Organization of the Living*. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland.

<sup>2</sup> Beer, R. D. (1990) *Intelligence as Adaptive Behavior. An Experiment in Computational Neuroethology*. Academic Press Inc. Pag.XVI.

(17) Negari tamen nequit, perceptionem & quod inue pendet per rationes mechanicas explicari non posse, hoc est, per figuras & motum. Quodsi fingamus, dari machinam, quae per structuram cogitet, sentiat, percipiat ; non obstat quo minus iisdem proportionibus retentis sub maiore mole construi concipiatur, ita ut in eam aditus nobis concedatur tanquam in molendinum. Hoc supposito, intus nil deprehendemus nisi partes se mutuo impellentes, nec unquam aliud quidpiam, per quod perceptio explicari queat.

(17) Hay que reconocer, por otra parte, que la percepción y lo que de ella depende resultan inexplicables per razones mecánicas, esto es, por medio de las figuras y de los movimientos. Porque, imaginémonos que haya una máquina cuya estructura la haga pensar, sentir y tener percepción; se la podrá concebir agrandada, conservandolas mismas proporciones, de tal manera que podamos entraren ella como en un molino. Esto supuesto, una vez dentro, no hallaremos sino piezas que se impelen unas a otras, pero nunca nada conque explicar una percepción.

G. W. Leibniz<sup>3</sup>

Dalai Lama: Does a one-celled creature like an amoeba have the whole range of cognitive events, such a desire, sexual desire, feeling and so on?

Varela: This is a disputed point. Some amoebas can behave as male and female. Sometimes they get together and exchange, not as one male one female, but nevertheless as sexual partners. They exchange genetic material,

Now, let's compare amoebas with bacteria. Bacteria are simpler cells. They also have sex. And they have the capacity to seek food and get away from things that are harmful, much like that little amoeba that I showed. Some people would say, with good reason, that in bacteria you'll find all of those behaviors, including cognitive behavior. Sensory-motor correlations happen inside the cell, all at one-cell level. But of course a bacterium has no neurons. On this basis it can be said that the nervous system does not invent cognition. It only expands the range of sensory-motor capacity. This is very important.

Dalai Lama: Therefore, would you consider a one-celled creature like an amoeba a sentient being?

Varela: Yes. From this point of view, there is no question. There is no way for me to draw a line and distinguish my cognition from the cognition of frogs, hydras, amoebas, or bacteria.

Francisco Varela<sup>4</sup>

---

<sup>3</sup> Leibniz, G. W. (1715) *Monadologia*. Trad.: Julian Velarde. Pentalfa, Oviedo 1981. Clásicos El Basilisco. El texto francés es el que André Robinet ofrece como definitivo a partir de la Copia B, con la gramática de su momento y sus errores corregidos por Gerhardt.

\* La apetición o apetito (*appetitus*) constituye el segundo concepto que sirve para explicar la esencia de la mónada. La percepción explica la mónada en cuanto determinada por el mundo (aspecto pasivo); el apetito, en cambio, nos la presenta en su aspecto activo, en el movimiento de una percepción a otra: «*Perception* m'est la représentation de la multitude dans le simple; et l'*appetit* est la tendance d'une perception á une autre» (Lettre a Bourguet, Dic. 1914, Gerhardt, Phil., III, 574 - 75.)

<sup>4</sup> Hayward, J. W., Varela. F. J. (2001) *Gentle Bridges. Conversations with the Dalai Lama on Sciences of Mind*. Shambala Publications Inc. pp. 66-67.

# INDICE

Prefacio .....	1
Hipótesis de partida. Objetivos de este trabajo. Desarrollo de este trabajo. Enfoque .....	10
Capítol 1. La Biosemiótica como marco de referencia .....	14
Prolegómenos para una biología fenomenológica.....	14
Orígenes de la Biosemiótica: el concepto de Umwelt de Jakob von Uexküll .....	16
Los circuitos funcionales, la conformidad al plan y el “encaje teleonómico” .....	19
El nacimiento de la biosemiótica.....	23
En defensa de las tesis sobre la Biosemiótica. ....	26
La biosemiótica como transdisciplina: prolegómenos para una biohermenéutica. ....	38
La Transdisciplinariedad .....	38
La investigación transdisciplinar según Jürgen Mittelstrass .....	42
Propuesta abierta: El diálogo dialogal transdisciplinar .....	42
Equivalente Homeomórfico y Hermenéutica Diatópica.....	44
La Biohermeneutica .....	45
Andreas Weber y el valor de la subjetividad biológica.....	48
Organicismo y Organicismo Cualitativo .....	53
Capítulo 2. Autopoiesis y la fenomenología de la cognición en biología.....	60
Autopoiesis.....	60
Enactividad Autopiética .....	60
Autopoiesis i cognición.....	68
Capítulo 3. En búsqueda de la cognición en la biología: Toma de sentido de subsistemas autopoieticos. 72	
Proto-cognición y coherencia en agentes proto-celulares e intra-celulares.....	72
Subsistemas autopoieticos.....	73
“Sintiencia” .....	75
Sobre las cuatro causas en la biología actual.....	78
Descripción modular de los sistemas autopoieticos .....	80
Agencias y agentes .....	82
Buffer: amortiguador y almacén de señales .....	85
Codeterminación entre agente y Umwelt .....	91
La percepción “óptica” de los centriolos: Primeros indicios de cognición celular .....	93
El fenómeno de la tensegridad y la mecanotransducción.....	97
La actividad de la actina y la miosina .....	110

Sistemas de reacción-difusión .....	115
Capítulo 4. Biocomunicación: De la mecanotransducción de señales a la toma de decisiones (decisión making) para dar sentido (sense making) .....	129
La semántica celular y códigos moleculares. Enfoques biosemióticos .....	131
La capacidad de memoria en la toma de decisiones: el caso de los interruptores moleculares.....	142
La toma de decisiones biomolecular: el caso de los mecanotransductores y la mecanorecepción discriminadora de ruidos. ....	145
La semántica celular de la toma de decisiones .....	146
Emergencia en la semántica molecular y en la toma de decisiones .....	148
De la toma de decisiones a la toma de sentido. ....	151
Conclusiones .....	153
Capítulo 5. Fenomenología de la Biología Cognitiva.....	154
Antecedentes históricos.....	154
Inicios de la teoría celular .....	154
Hacia una teoría psicológica de la célula: Ernst Haeckel.....	156
La psicofisiología de los protistas en Max Werbon .....	159
Alfred Binet y la “vida psíquica” de los microorganismos .....	163
Herbert Spencer Jennings y su método de ensayo-error en los organismos inferiores .....	166
Friedrich Nietzsche y Charles S. Peirce .....	172
Ramón Turró y la base trófica de la inteligencia.....	175
Capítulo 6. Fundamentos de la Cognición .....	183
Fundamentos cognitivos no-representacionistas .....	183
Fundamentos de la Cognición Mínima.....	193
Los sistemas nerviosos y el dominio cognitivo.....	197
Estudio de un caso: La bacteria Escherichia coli .....	199
El comportamiento quimiotáctico en Escherichia coli .....	199
Sistema de transducción de señales de dos componentes (TCST) .....	201
Cognición mínima como coordinación sensoriomotora.....	203
De la adaptación metabólica a la cognición mínima .....	204
Aspectos de la cognición mínima.....	206
Implicaciones.....	207
El antropocentrismo y la dicotomía entre la cognición y los instintos-reflejos.....	207
Cognición mínima como coordinación sensoriomotora.....	208
Biología Cognitiva y los Principios Mínimos Cognitivos.....	209
El concepto de biología cognitiva , la pregunta por la cognición, y sus fundamentos pre-bióticos .....	212

La aportación de Gregory Bateson a la biología cognitiva .....	220
Fundamento cognitivo indispensable: el papel de la regulación .....	233
Un breve estudio de una especie de mixomicetos:.....	239
Physarum polycephalum .....	239
Capítulo 7. Aspectos morfológicos y fisiológicos de los Mohos Mucilaginosos o Mixomicetos	
242	
Mixomicetos.....	242
Physarum polycephalum: Breve resumen morfológico y fisiológico.....	243
Ciclo de vida.....	243
Movimiento y comportamiento de transmisión de flujo (streaming) .....	245
Oscilaciones en el streaming .....	246
El papel de los microtúbulos en la dinámica motriz y en la quimiotaxis .....	250
Integración de la información detectada en la quimiotaxis .....	252
Capítulo 8. Breve historia del estudio científico de los mixomicetos, partiendo de la historia	
de la micología. ....	255
Orígenes de la clasificación de los hongos.....	255
Comienzos de la Micología y el descubrimiento de los mixomicetos. Una nueva ciencia:	
la micología .....	256
Los estudios de los mixomicetos en el siglo XIX .....	258
Heinrich Anton de Bary .....	258
Christian Ernst Stahl.....	259
Wilhelm Friedrich Philipp Pfeffer.....	260
El descubrimiento del Dictyostelium: Julius Oskar Brefeld .....	261
Kenneth Bryan Raper .....	263
Arthur Arndt y John Tyler Bonner .....	264
Los primeros estudios del Physarum polycephalum: Frank Leslie Howard .....	269
William E. Seifriz.....	270
Noburô Kamiya y el pulso de protoplasma .....	272
El desarrollo de la protistología actual sobre la investigación de los Physarum polycephalum	275
Tetsuo Ueda. Las oscilaciones periódicas como parámetro de un comportamiento	
adaptativo. ....	279
Atsuko Takamatsu. Los osciladores acoplados microfabricados y el concepto de	
“ <i>mobiligence</i> ” .....	282
Toshiyuki Nakagaki: Hacia una descripción de la cognición en los mixomicetos: .....	286
Andrew Adamazky. La robótica híbrida con mixomicetos. Capacitación cognitiva	
adaptativa .....	312
Tanya Latty: Los Juegos del Hambre y la Memoria Espacial .....	322

Conclusiones .....	335
La biosemiótica como ciencia transdisciplinar.....	335
Cognitismo en los hongos mucilaginosos .....	337
La inteligencia social de las bacterias .....	341
Transferencia de información e irritabilidad celular: El proceso cognitivo mínimo y la ley de Weber-Fechner .....	344
Conclusiones finales.....	348
TABLA DE RELACIONES DE PRINCIPIOS MÍNIMOS COGNITIVOS .....	351
Bibliografía .....	356

## Prefacio

A lo largo de más de seis años me he dispuesto a trabajar por la pregunta sobre la percepción y la capacidad de decisión de actuación de los seres vivos. Pero no lo he hecho circunscrito en los estudios epistemológicos sobre la fisiología ni tampoco desde las teorías evo-devo, ni siquiera en biología de sistemas. El porqué es la razón de mi trabajo: porque no se puede desde dichas disciplinas llegar a saber cómo perciben los organismos su entorno *desde su capacidad intrínseca de percepción*. La pregunta por saber cómo percibe un organismo sencillo, unicelular, como por ejemplo una ameba, su medio circundante ha sido mi caballo de batalla. Y este me ha llevado a la pregunta de cómo dichas amebas transducen las señales que reciben del medio inmediato y como sienten ese medio inmediato desde su realidad existencial. Los estudios acerca de la microbiología ofrecen descripciones de dichas transducciones de señales, lo que ocurren en ciertos receptores y como afecta la recepción a nivel del citoplasma, y que actividad nuclear provocan (en el caso de las eucariotas). Esto ocurre igualmente en las procariotas donde hay mayor concentración de estudios respecto a las señalizaciones célula-célula para una descripción de lo que actualmente se denomina “comunicación celular”. Desde luego que dichos estudios han sido en gran parte la base fundamental para mi camino iniciático hacia la pregunta por la percepción y la interrelación entre células donde se origina principios de sociobiología de gran calado en la historia de la filosofía de la biología. Pero quise ir más allá.

Mi recorrido en la historia del pensamiento en la biología comienza en mi trabajo de investigación<sup>5</sup> con los primeros conceptos sobre la autoorganización ya incitados en la Crítica del Juicio Teleológico de Immanuel Kant<sup>6</sup>. De hecho Kant menciona los estudios de Johann Friedrich Blumenbach sobre la “*Bildungstrieb*”<sup>7</sup> o lo que es lo mismo un “impulso formativo”, “una tendencia natural a la formación de los organismos”, diferenciándola de la “*Bildungskraft*” o “fuerza de conformación” que es una facultad de la materia puramente mecánica. Después de Kant he pasado por la teoría de las energías específicas de Johannes Peter Müller<sup>8</sup> y su “inversión kantiana” de la percepción<sup>9</sup>, tan admirada como posteriormente criticada por Hermann von Helmholtz<sup>10</sup>.

---

<sup>5</sup> Castro, O. (2009) *Jakob von Uexküll. El concepto de Umwelt y el origen de la biosemiótica*. Tesis para la Diplomatura de Estudios Avanzados. Universidad Autónoma de Barcelona.

<sup>6</sup> KdU, § 81.

<sup>7</sup> Blumenbach, J. F. (1781) *Über den Bildungstrieb und das Zeugungsgeschäfte*. Göttingen, Dieterich. Mit e. Vorw. u. Anm. von L. v. Károlyi.

<sup>8</sup> Müller, J. P. (1837) 2 Vol. *Handbuch der Physiologie des Menschen für Vorlesungen*. Coblenz, Verlag von J. Hölscher.

<sup>9</sup> Mientras que Kant sostenía que cuando uno percibe, tiene unas formas dentro de uno mismo; unas formas que son el espacio y el tiempo, y que éstas son puestas por el propio sujeto. Por su parte, Johannes Müller mostraría, desde un punto de vista materialista, con su teoría de las energías específicas cómo el tiempo y el espacio eran puestos por el sujeto biológico. Etcheverry, J. L. Traducción cambio y tiempo. Conferencia ofrecida en la facultad de psicología de la Universidad de la República Oriental del Uruguay, 16 de octubre de 1995. En Castro, O. Opus Cit. Pág. 39.

<sup>10</sup> Para estudiar exhaustivamente las afinidades y las discrepancias entre Helmholtz y su maestro Müller ver los interesantes artículos:

A través de Müller pude llegar al concepto de “*Zielstrebigkeit*” de Karl Ernst von Baer que es la capacidad de “direccionalidad” (directness) en el tiempo de un organismo conforme a la adaptabilidad del conjunto “organismo-entorno”<sup>11</sup>. Baer relacionó la “*Zielstrebigkeit*” con la epigénesis a través de su concepto de “*Gestaltungskraft*” (facultad formativa, o potencia formadora) que, a su vez, enlaza con la “*Bildunstrieb*” (tendencia formativa u organizadora) de Bumenbach<sup>12</sup>. Fue entonces, partir de Baer, que tuve un punto donde se bifurcaba mi recorrido. Si me ceñía a la línea darwinista del desarrollo autoorganizativo de la percepción, entraba en un callejón sin salida para mi propósito de estudio. El problema no lo solventa Charles Darwin. De hecho profundizando en el concepto sobre la autoorganización en la obra de Darwin, no existe más que dos alusiones a lo que denominaba “generación espontánea”, donde la vida la considerada como surgida de desperdicios o basura en una carta dirigida a Hug Falconer en octubre de 1862<sup>13</sup>, y también en un sentido que actualmente estaría emparentado con la “abiogénesis” en una carta a Joseph Dalton Hooker en 1871<sup>14</sup>. Ofrecerle a Darwin mayor énfasis en la cuestión sobre la autoorganización sería hacerle un flaco favor en honor a la verdad histórica. Lo más cercano en Darwin a la consideración de una necesidad de organizarse un organismo, o un agente autónomo, sería básicamente si lo hace “en provecho para su propia supervivencia”. Por lo que la pregunta sobre el desarrollo autoorganizativo de la percepción se reduciría a un mero desarrollo evolutivo de los mecanismos de los sentidos<sup>15</sup>.

---

S. Finger and N. J. Wade. *The Neuroscience of Helmholtz and the Theories of Johannes Müller. Part I. Nerve Cell Structure, Vitalism, and the Nerve Impulse.* Journal of the History of the Neurosciences, Vol. 11, Nº 2. Págs. 136 - 155, June 2002.

S. Finger and N. J. Wade. *The Neuroscience of Helmholtz and the Theories of Johannes Müller. Part II. Sensation and Perception.* Journal of the History of the Neurosciences, Vol. 11, Nº 3. Págs. 234 - 254, September 2002.

<sup>11</sup>Baer, K. E. von (1864) *Reden gehalten in wissenschaftlichen Versammlungen und kleinere Aufsätze vermischten Inhalts.* Schmitzdorff. St. Petersburg.

<sup>12</sup> Lenoir, T., (1989) *The Strategy of Life: Teleology and Mechanics in Nineteenth-Century German Biology.* University of Chicago Press. Pág 120. En Castro, O. (2009) Op. Cit. p. 86.

<sup>13</sup> “I look at it as absolutely certain that very much in the Origin will be proved to be rubbish; but I expect and hope that the framework will stand”. Darwin, F., Seward, A. C., eds. (1903) *More letters of Charles Darwin. A record of his work in a series of hitherto unpublished letters.* London: John Murray. Vol. 1. p. 209.

<sup>14</sup> “warm little pond, with all sorts of ammonia and phosphoric salts, lights, heat, electricity, etc. present, so that a protein compound was chemically formed ready to undergo still more complex changes”. Darwin, F., ed. (1887). *The life and letters of Charles Darwin, including an autobiographical chapter.* London: John Murray. Volume 3. p. 18.

<sup>15</sup> De hecho Darwin en *El Origen de las Especies* habla en dos ocasiones sobre el fenómeno de la percepción. Una lo hace en referencia a la rata de mina (*Neotoma*) y el tamaño de sus ojos en función de la adaptación en la oscuridad y su inadaptación a la percepción en mayor intensidad de luz. (*On the origin of species.* 3th ed. Chap. V. p 154.) La otra ocasión la hace en referencia a la estrella del mar a las que alude tener células pigmentarias, que parecen servir como órganos de vista sin nervios, no para formar una imagen, sino sólo para concentrar los rayos luminosos y hacer su percepción más fácil. (*Origen de las Especies.* 1ª Traducción en castellano. 1877. p. 197.)

Respecto a la evolución del ojo Darwin escribe:

“How a nerve comes to be sensitive to light hardly concerns us more than how life itself first originated; but I may remark that several facts make me suspect that any sensitive nerve may be rendered sensitive to light, and likewise to those coarser vibrations of the air which produce sound.” (*On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life.* 1th ed. 1859. p.187.)

Por lo que me adentré en un desconocido pero prometedor camino hacia la capacidad de preguntarse por la percepción de los organismos: el del concepto de “*Umwelt*”. La primera literatura que me llegó sobre este tema fue un artículo del bioquímico danés, Jesper Hoffmeyer, sobre una nueva disciplina que desconocía por completo: la biosemiótica<sup>16</sup>. A partir de este y de un segundo artículo – que leí de inmediato – realizado por el mismo Hoffmeyer y el filósofo y biólogo Claus Emmeche sobre el lenguaje de la naturaleza y las metáforas semióticas en biología<sup>17</sup> me fui introduciendo en esta nueva disciplina, gracias al concepto de *Umwelt* y con dicho concepto al padre de la disciplina: Jakob von Uexküll. Uexküll fue un biólogo y filósofo estonio, desconocido para los propios biólogos, pero que sin él el concepto de etología no hubiese sido posible, al menos desde la perspectiva que desarrolló Konrad Lorenz (pues fue discípulo de Uexküll). Ahora bien, mientras que Lorenz era tan kantiano como Uexküll – igual que Ernst Cassirer, amigo de ambos – Lorenz era darwinista mientras que Uexküll era antidarwinista acérrimo. Uexküll no tuvo una iniciación darwinista adecuada, más bien fue impuesta cuando estudiaba en la Universidad de Tartu<sup>18</sup>.

Lo cierto es que aunque no comulgase con el darwinismo de su época, las ideas de Uexküll han sido fundamentales para muchos desarrollos posteriores en la biología como en la cibernética, en la teoría general de los sistemas, en ecología, en medicina<sup>19</sup> y en la semiótica (aplicada a los animales o zoosemiótica<sup>20</sup>) gracias a conceptos como círculo o circuito funcional – “*Funktionkreis*” – o el de *Umweltlehre*.

---

“Apenas nos concierne cómo un nervio llega a ser sensible a la luz, más que saber cómo la misma -vida se originó; pero yo puedo observar que como algunos de los organismos inferiores, en los cuales no se puede encontrar nervios, son capaces de percibir luz, no parece imposible que ciertos elementos sensibles de su sarcoda se vayan agregando y desarrollando en nervios dotados con esta especial sensibilidad”. (*Origen de las Especies*. 1ª Traducción en castellano. 1877. p. 197.)

[“El saber cómo un nervio ha llegado a ser sensible a la luz, apenas nos concierne más que saber cómo se ha originado la vida misma, pero puedo señalar que, como quiera que algunos de los organismos inferiores, en los cuales no pueden descubrirse nervios, son capaces de percibir la luz, no es imposible que ciertos elementos sensitivos de su sarcoda llegasen a reunirse y desarrollarse hasta constituir nervios dotados de esta especial sensibilidad”. (*El Origen de las Especies*. Traducción José P. Marco. Editorial Grijalbo. 1992. p. 223.)]

<sup>16</sup> Hoffmeyer, J. (1997) *Biosemiotics: Towards a New Synthesis in Biology*. European Journal for Semiotic Studies, 9 (2). Pags. 355-376.

<sup>17</sup> Emmeche, C., Hoffmeyer, J. (1991) *From language to nature - the semiotic metaphor in biology*. Semiotica 84 (1/2). Pags. 1-42.

<sup>18</sup> Uno de sus profesores en Dorpat (la actual Tartu), Julius von Kennel (1852-1939) especulaba sobre las líneas ancestrales de los animales, el cual Uexküll quedó totalmente insatisfecho. Uexküll era víctima de las erróneas especulaciones teóricas del darwinismo de su tiempo y por ello combatió contra ello.

Uexküll recuerda cómo fue tomada inicialmente de forma muy elegante la potencia de esta teoría de Charles Darwin del desarrollo de las especies mediante la selección natural. Sin embargo, como él decía, “Kennel ha estropeado completamente esta impresión cuando él me aseguró que estaría en condiciones de demostrar que conoce la relación existente entre todas las especies animales, independientemente de cuáles. Acertadamente me dije a mí mismo: este es un juego frívolo y no una ciencia”. Kennel alegaba que uno puede construir un árbol filogenético entre cualquier par de organismos o especies, algo que Uexküll no encontró suficientemente serio. Castro, O. (2009) Op. Cit. p. 18.

<sup>19</sup> El concepto de “psicosomatismo” que desarrolló su hijo Thure von Uexküll se fundamenta en los conceptos de *Umweltlehre* de su padre.

<sup>20</sup> Thomas Albert Sebeok fue quien recogió el testigo de Jakob von Uexküll en su carrera como semiótico fundando el concepto de zoosemiótica en 1963 extraído en un estudio sobre la comunicación de las abejas, el sonar de las mariposas y la intercomunicación entre los delfines y los humanos. Pero fue en sus

Pero ¿qué fue lo que me dejó tan asombrado como magnetizado, tanto el concepto de Umwelt como la Biosemiótica? Primeramente, que el concepto de Uexküll sobre Umwelt – que tiene algo más de un siglo de usufructo en biología – concentra su significado en la pregunta sobre cómo los organismos perciben su medio inmediato y cómo “su medio inmediato” se distingue del concepto de “entorno” o “Umgebung” e incluso el de mundo exterior o “Außenwelt”. Es decir, el Umwelt es el medio inmediato reconocido por el organismo, según su constitución perceptiva – denominado por Uexküll como “Innenwelt”. Éste “Innenwelt” o mundo interno del organismo se establece gracias a los circuitos funcionales o “Funktionkreises” inherentes en el organismo, proporcionando así la capacidad de interacción con dicho “Außenwelt” o mundo exterior.

¡Eureka! Me dije. Es algo que iba buscando hace años, desde que empecé a investigar para una primera tesis sobre el desarrollo emergente de la consciencia en función de la superveniencia biofísico-química del citoesqueleto neuronal.

Pero después de estos años de estudios y de algunas publicaciones y charlas al respecto de los aspectos biosemióticos de la consciencia en el ser humano<sup>21</sup>, decidí hacer un paréntesis temporal sobre el tema. Fui descubriendo, a medida de que iba profundizando, la magnitud de los vacíos y de hipótesis no resueltas que se mostraban en el desarrollo de la investigación internacional sobre los fundamentos neurológicos y neurofilosóficos de entramado. La problemática fundamental reside en el vacío experimental que existen entre las diversas hipótesis mecanocuánticas a gran escala de los microtúbulos neurales<sup>22</sup> como punto de arranque hacia una explicación de una emergencia del estado de despertar consciente (awareness) de un estado anestésico<sup>23</sup> introducidas inicialmente por el anestesiólogo Stuart Hameroff y el físico y oncólogo Jack Tuszynski; y por otro lado, la capacidad de sincronización de grupos neuronales en gran escala en bandas beta y gamma que Francisco Varela, Jean-Philippe Lachaux, Eugenio Rodríguez y otros colegas ofrecían como posibilidad de funcionalidad neurofenomenológica y de la conducta coherente cognitiva<sup>24</sup>.

Ambos extremos se tocan, pero el camino experimental que ha de corroborar las hipótesis de Hameroff, están fundamentadas por la teoría física de la Reducción Objetiva Orquestada, una teoría cuántica desarrollada principalmente por el eminente

---

“Perspectivas en zoosemiótica” en 1979 donde quedó explícito tanto el neologismo interdisciplinario como la estructuración de sus estudios. En 1979 constataría su íntima relación con Jakob von Uexküll como padre de la biosemiótica. Castro, O. (2009) Op. Cit. p. 28.

<sup>21</sup> Castro, O. (2006) *Aspectos Biosemióticos de la Consciencia. En búsqueda de los signos significativos de la vida y su autoreferencia en la conciencia como principio teleonómico*. Revista Pensamiento. Vol. 62. N° 234. Pp. 471-504.

<sup>22</sup> Hagan, S., Hameroff, S. R., Tuszynski, J. A. (2002) *Quantum computation in brain microtubules: Decoherence and biological feasibility*. Physical Review E. Vol. 65, 061901.

<sup>23</sup> Louriá, D., and Hameroff, S. (1996) *Computer simulation of anesthetic binding in protein hydrophobic pockets*. In: *Toward a Science of Consciousness - The First Tucson Discussions and Debates*, S.R. Hameroff, A. Kaszniak and A.C. Scott (eds.), MIT Press, Cambridge, M A.

<sup>24</sup> Varela, F.J., Lachaux, J.-P., Rodríguez, E., Martinerie, J. (2001) *The brainweb. Phase synchronization and large-scale integration*. Nature Reviews Neuroscience. Vol.2. April 2001. Pp. 229-239.

físico de Roger Penrose<sup>25</sup>, donde ofrece una salida al problema de entrelazamiento cuántico a través de un andamiaje matemático que tiene como objetivo resolver el colapso de la función de onda a través de la gravedad cuántica, problema que hoy en día está aún por resolverse.

Ante dicho panorama, retomé el trabajo de Jakob von Uexküll y comencé a las lecturas de sus *Meditaciones Biológicas*<sup>26</sup> y algunos artículos de biosemióticos actuales como Hoffmeyer<sup>27</sup>, Emmeche<sup>28</sup>, Thomas A. Sebeok<sup>29</sup>, Torsten Rütting<sup>30</sup>, Thure von Uexküll<sup>31</sup> y a Kaveli Kull que me ayudó mucho a dimensionar el trabajo de Uexküll<sup>32</sup> que estaba leyendo y que hasta el momento tuve mis dificultades de entendimiento. La problemática estribaba en dos aspectos fundamentales: primero, que ninguno de los cuatro textos de Uexküll existentes traducidos al castellano<sup>33</sup> tienen apenas notas a pie de página que expliquen la terminología alemana que el propio Uexküll había construido, y a la inversa, las terminologías descritas en castellano no tienen su referencia en alemán; y el segundo problema es que las ediciones de dicha tetralogía están realizadas entre 1934 y 1945 por lo que no tienen un vocabulario que sea fácilmente enlazable a la biología teórica actual. Con esto y todo me sumergí en el *Umwelt* de Uexküll al haber comprendido el motivo de su emocionante cruzada: *poder entender la condición subjetiva con la que un organismo vive su mundo*, es decir, una “biología subjetiva y una fisiología subjetiva” como Uexküll declaraba. Sus sueños comenzaron a ver sus frutos al fin cumplidos los 58 años: el “Institut für Umweltforschung”, un centro de investigación de la percepción subjetiva de los organismos – especialmente de los invertebrados marinos – en Hamburgo. A la edad de 61 años por fin es admitido en la Universidad de Hamburgo como asesor científico,

---

<sup>25</sup> La literatura científica de Penrose junto con Hameroff en la descripción de la reducción objetiva orquestada para el estudio de la consciencia es muy extensa. El artículo que impactó en la comunidad científica al respecto fue Hameroff, S. R., Penrose, R., (1996) *Orchestrated reduction of quantum coherence in brain microtubules: A model for consciousness*. En: *Toward a Science of Consciousness - The First Tucson Discussions and Debates*, S.R. Hameroff, A. Kaszniak and A.C. Scott (eds.), MIT Press, Cambridge, MA. Also published in *Mathematics and Computers in Simulation* 40:453-480.

<sup>26</sup> Uexküll, J. von (1940) *Bedeutungslehre*. Leipzig: Verlag von J.A.Barth. En castellano: *Meditaciones Biológicas. Teoría de la Significación*. Traducción de José M. Sacristán. Revista de Occidente. Madrid, 1942.

<sup>27</sup> Hoffmeyer, J. (2004) *Uexküllian Planmässigkeit*. *Sign Systems Studies* 32.1/2, pp. 73-95.

<sup>28</sup> Emmeche, C (2001) *Does a robot have an Umwelt: Reflections on the qualitative biosemiotics of Jakob von Uexküll*. *Semiótica*. Nº 134. Págs. 653-693.

<sup>29</sup> Sebeok, Th. (1994) *Signs. An Introduction to Semiotics*. University of Toronto Press, Toronto & Buffalo. En castellano: *Signos: una introducción a la semiótica*. Ediciones Paidós Ibérica, S.A., 1996, Barcelona. Pág. 137

<sup>30</sup> Rütting, T (2004) *History and significance of Jakob von Uexküll and of his institute in Hamburg*. *Sign Systems Studies* 32. p. 35-71.

<sup>31</sup> Uexküll, Th. von (1989) *Jakob von Uexküll's Umwelt-Theory*. En: Sebeok, Th. A., Umiker-Sebeok, J. *The Semiotic Web*. Berlin. Mouton de Gruyter. Págs. 129-158.

<sup>32</sup> Kull, K. (2001) *Jakob von Uexküll. An Introduction*. *Semiótica*. Nº 134. Pág 1-59.

<sup>33</sup> Uexküll, J. von (1934) *Ideas para una concepción biológica del mundo*. Espasa-Calpe. Col. Biblioteca de Ideas del Siglo XX. Madrid.

Uexküll, J. von (1940) *Meditaciones Biológicas. Teoría de la Significación*. Traducción de José M. Sacristán. Revista de Occidente. Madrid, 1942.

Uexküll, J. von (1930) *Teoría de la Vida*. Editorial Svmma, Madrid 1944.

Uexküll, Jakob von, (1920) *Cartas biológicas a una Dama*. Traducción de Manuel G. Morente. Revista de Occidente, Madrid 1945 (2ª ed.).

teniendo su primera retribución económica en una Universidad, puesto que siempre se había financiado él mismo sus propias investigaciones.

Uno de los motores de mi investigación para la diplomatura de estudios avanzados ha sido la relevancia de sus investigaciones en la teoría de sistemas de Berlanlanfy y en la teoría de las catástrofes de René Thom, entre otros, pero al mismo tiempo hubo un olvido de su persona por parte de los biólogos. Esto ha sido así hasta bien entrada la época de los noventa por un círculo de bioquímicos y biofísicos preocupados por la semiótica y de un círculo de semióticos preocupados por la biología etológica han resucitado algunas de sus tesis y que han forjado los pilares de la biosemiótica actual.

En las lecturas múltiples de sus obras y artículos en inglés y en alemán sobretodo, me topaba una y otra vez con el estudio de los antiguamente llamados infusorios y rizópodos, como planteo fundamental por la importancia del protoplasma en las células y organismos unicelulares. De los más nombrados se encuentran los paramecios y el grupo de mixomicetos. Al principio no le daba mucha importancia, puesto que mi pregunta por el Umwelt en biosemiótica estaba enfocada a si era condición de posibilidad de una fase inicial al constructo de la consciencia en el ser humano. Cuando un buen día, hacia enero del 2008, recibí un inesperado pero interesante correo electrónico. Me lo mandaba el profesor Halil Dermitas, un biólogo médico de la Universidad de Erciyes en Kayseri, Turquía. Había leído mi artículo sobre los aspectos biosemióticos de la consciencia y me quiso pedir un favor. Me mandó una carta al director para la revista Pensamiento, para que publicara dicha misiva. Dicha carta no pudo publicarse en la revista, pero era la primera vez que veía en nota a pie de página la referencia a mi artículo. La carta que me escribió el sr. Dermitas es la siguiente (pongo en cursiva los puntos importantes):

De: "demtas@erciyes.edu.tr"<demtas@erciyes.edu.tr>

Para: oscarcastrogarcia@yahoo.es

Enviado: jueves, 17 de enero, 2008 11:00:59

Asunto: Cellular intelligence

Dr. Garcia OC, Univ Autonoma Barcelona,

Calle Doctor Combelles, 14,3 0 A,

Lleida, Spain

oscarcastrogarcia@yahoo.es

Dear Sir,

I have found your address in the literature of cellular intelligence.

I wish communicate my annexed letter to the Editor of the periodic

Pensamiento to be published if yours evaluation is affirmative.

Furthermore, I do not know address precise of the Editor to send my letter. Can you spare

time to guide me to send my letter to the relevant Editor?

I will be most grateful if you help for this correspondence.

I look forward to hearing from you.

Yours sincerely

Pr. H. Demirtas

Erciyes Univ. Medical Fac. Medical Biol.

38039 Kayseri- Turkey

Letter to the Editor:

### **Cellular consciousness or cellular intelligence?**

(An observation with the slime mold *Physarum polycephalum*).

Despite its large dimension and plurinuclear nature, *Physarum polycephalum* (Pp) plasmodio is a unicellular organism. In diploid form, *P. polycephalum* possess three states of existence: Plasmodio, sclerotium and spherule. Sclerotium and spherule are dormant states formed when the organism meets an adverse condition.

In the plasmodio stage, Pp can grow in laboratory temperature (20-25 C°) and does not necessitate a special incubator. However, in some countries like Turkey, laboratory temperature can rises to 30-40 C° in summer and Pp can undergo three resistant forms in such conditions: sclerotium, spherule and spore; the last requiring some light to be formed. To prevent these transformations in summer, a refrigerated incubator is needed. Unfortunately, I did not have this equipment and I placed a culture of Pp (on the agar medium in Petri dish) in the refrigerator at 4-5 C° for subsequent enzymatic essay (1). The following day, I did not find Pp in the Petri dish where it was growing. *It escaped from the covered Petri dish like a multicellular organism having a nervous system, not approving of the furnished temperature.* A trace of yellow pigment was visible on the solid agar medium. I sought it in every hole and corner in the refrigerator, on the grills for example and but not find it. Finally, to my disappointment, *I found it concealed just in the middle of the bottom of the Petri dish in sclerotium form as a dormant hardened mass.* I did not repeat this observation to standardize it, since my principal goal was not cellular behavior study or search for conditions for the sclerotium formation. I wished simply preserve my “studying material” to be used in the future (the next day) and this trial appeared unsuccessful. Therefore, I contented with noting down this curious event and now, I wish to share this observation with scientists interested in cellular intelligence (2-5) because I did not meet such an observation in the literature of unicellular organisms. *The escape of Pp from the dish follows the steps below and these steps include four concepts: perception, conceiving / reasoning, decision and execution.*

By escaping from the covered Petri dish and transforming itself to the dormant (sclerotium) state in the outside, Pp fulfilled the following steps of cellular intelligence:

1. *Pp plasmodio perceived that its environment was not favorable for its existence as a plasmodio.* The temperature was less than the acceptable limit. This step (to appreciate that the medium is not favorable to growing) is common in many unicellular organisms including bacteria. However, Pp did more than this:

2. *Pp plasmodio has conceived and decided that it was necessary to quit this hostile place and might find another environment,* which might be better than the present medium.

3. *To slip out of this enclosed dish, it expended a large amount of energy in the cellular level, to escape through the dish and its cover, (the two are made of glass), heavy enough for the unicellular energy to lift it.* Possibly Pp found an irregularity (a breach) invisible to us between the dish and its cover. Consequently, Pp has achieved (executed) this task.

4. *After escaping from “its prison”, Pp has conceived that the space outside of the dish was not less hostile than “its prison”. Furthermore, there was any trace of nutritive in the environment to be used immediately or in the future. Therefore, Pp has decided to rest in dormant state waiting for a favorable “season” nearest to this “prison”, where existence of foods was verified previously and it executed this decision.*

The strain name 'polycephalum' is given to this organism by their appearance in plasmodio state. It appears that poycephalia are full of intelligence and this name fits well to its behavior. Pp appears a good choice for the cellular intelligence studies of unicellular organisms.

1. Demirtas H. Effect of the thermal variation on the molecular weight estimation of the acid phosphatase from Physarum polycephalum. *Biochimie* 65: 371-375, 1983.

2. Garcia OC. Biosemiotic aspects of consciousness- in search of signs of life and their connection to consciousness as a telonomical principle. *Pensamiento* 62 (234): 471-504, 2006.

3. Hellingwerf KJ. Bacterial observation: A rudimentary form of intelligence? *Trends Microbiol* 13 (4): 152-158, 2005.

4. Patnaik PR. Are microbes intelligent beings?: An assessment of cybernetic modeling. *Biotechnol Adv* 18(4): 267-288, 2000.

5. Tsuda S. Zauner KP, Gunji YP. Robot control with biological cells. *Biosystems* 87 (2-3): 215-223, 2007.

Me quedé un poco descolocado, puesto que no había oído hablar nunca de estos plasmodios. Al comprobar de qué familia de mohos mucilaginosos hablaba el profesor Demirtas topé que se trataban de “mixomicetos”.

Me di cuenta que estos eran los determinados seres unicelulares que durante muchos años fueron considerados como rizópodos y que Uexküll menciona al hablar de su comportamiento tan curioso como inteligente<sup>34</sup>. Desde ese instante supe que tenía que hacer un giro de 180° en mis investigaciones. No se trataba de configurar una plausibilidad del Umwelt en la cognición humana, sino de que tipo de percepción del entorno tienen estos organismos tan “sencillos”. Es decir, mi pregunta se dirigía a si donde hay vida, por muy elemental que sea, hay percepción, sensibilidad, o como dice Demirtas, concepción, decisión... en pocas palabras *principios mínimos cognitivos*.

En junio del mismo año, escribí al profesor Demirtas preguntándole sobre su experiencia, que parece ser datada en el verano de 1983, cuando investigaba sobre el fosfatasa ácida<sup>35</sup> aplicado en los Physarum polycephalum. Le dije que la descripción que

---

<sup>34</sup> Uexküll cita: “En un principio, todos los gérmenes de los seres vivos se hayan formados por células de protoplasmas libres, que responden únicamente a la inducción melódica de su yo.” (...) “Nadie puede dudar que la mecánica firmemente elaborada del cuerpo del mixomiceto es un producto de células de existencia libre que únicamente es consecuencia de la melodía que gobierna los sonidos de su yo”.

Uexküll, J. von (1940) *Meditaciones Biológicas. Teoría de la Significación*. Op.Cit. pp. 38-39.

Más adelante volveremos a explicar respecto este pasaje los conceptos de “melodía” y “sonidos de su yo” (Ich-ton) y su actual significación, puesto que es muy reciente su descubrimiento experimental.

<sup>35</sup> Las fosfatasas ácidas (FA) son enzimas hidrolíticas, de localización lisosómica, pertenecientes al grupo de las fosfomonoesterasas, que actúan sobre los ésteres del ácido fosfórico. Las fosfatasas ácidas se encuentran presentes en casi todos los tejidos del organismo, siendo particularmente altas sus cantidades en próstata, estómago, hígado, músculo, bazo, eritrocitos y plaquetas. Se ha visto que en individuos con carcinoma de próstata, se produce una elevación en los niveles de la enzima en suero, como consecuencia del aumento de isoenzima prostática.

Halil Demirtas estudiaba si proteínas fijadoras (Binding Proteins) eran capaces de resistir determinados incrementos de temperaturas en la interacción con la fosfatasa ácida para poder si podían ser válidas utilizadas como marcadores en estudios genéticos para el Physarum polycephalum.

me había ofrecido se asemeja con lo que podría ser designado como una identificación de su Umwelt homeostático. Le pregunté si había realizado algún estudio sobre su pH antes o después de la circunstancia. El profesor Demirtas me contestó que en sus observaciones que el *Physarum polycephalum* se había escapado de la placa Petri no porque decreciera el pH, pues dicho descenso de pH se produce también en condiciones normales en incrementos de temperatura de 24 a 26 ° C, pero por ese caso – y lo que se espera – es que el organismo se transforme en esclerocio en ese mismo lugar, *sin abandonar su medio de cultivo*. Como esclerocio es una forma muy resistente a las condiciones adversas. Pero por el contrario, el mixomiceto se escapó como plasmodio de su medio porque la temperatura descendió repentinamente a 4-5°C. Es más, asintió Demirtas, para que me hiciese una idea, al terminar el crecimiento, el pH puede decrecer desde el neutro hasta un 5,5-5,0.

El profesor Demirtas fue tan amable que hasta habló de esto con el editor de “Physarum Newsletter”, el Dr. Mark R. Adelman y me invitó para que en un futuro pudiésemos publicar juntos, y que cooperase como co-autor si me dedicaba a esta línea de investigación.

Espero y deseo que después de casi cuatro años de infatigable, paciente y solitaria investigación se mantenga aún en pie su propuesta.

Cinco días después el profesor Demirtas me envió otro correo electrónico donde me adjuntaba un artículo sobre los trabajos del profesor Toshiyuki Nakagaki y sus colegas del Bio-Mimetic Control Research Center en Nagoya, Japan. El profesor Nakagaki había publicado en la revista “Nature” sobre el comportamiento del *Physarum polycephalum* en un laberinto<sup>36</sup>. Cuando acabé de leer tanto el artículo que adjuntó el profesor Demirtas como el del profesor Nakagaki en “Nature” supe entonces de forma fehaciente que este era el camino que debía seguir mi investigación para esta tesis doctoral.

---

Demirtas, H (1983) *Effect of the thermal variation on the molecular weight estimation of the acid phosphatase from Physarum polycephalum*. Biochimie N° 65. pp. 371-375.

<sup>36</sup>Nakagaki, T. Yamada, H, Toth, A. (2000) *Maze-solving by an amoeboid-organism*. Nature, Vol. 407 (09.28.2000) p. 470.

**Hipótesis de partida. Objetivos de este trabajo. Desarrollo de este trabajo. Enfoque**

La cuestión sobre la cognición en organismos sin sistema nervioso es el principal objetivo de mi trabajo de investigación. Desde que comencé a estudiar los fundamentos de la biosemiótica y sus orígenes a través del biólogo marino Jakob Johann von Uexküll (1864-1944), se ha ido desarrollando en mi formación tan filosófica como científica una visión fenomenológica del sentido de lo que denominamos la vida. De hecho, Uexküll fue rechazado de los estudios de la biología, todo y siendo uno de los primeros pilares de los estudios de los estímulos reflejos en los nervios periféricos de los invertebrados marinos. Pero su afinidad por la cuestión por la vida vista desde el sujeto viviente fue uno de los caballos de batalla que lidió contra el desarrollo neo-darwinista del momento, el mecanicismo, y los reduccionismos físico-químicos de la fisiología biológica. Su alianza con el vitalismo del siempre mal interpretado Hans Driesch acabó siendo objeto de rechazo en la comunidad científica, aun siendo Uexküll el padre de la etología y maestro de Konrad Lorenz. Me di cuenta que los desarrollos sobre el problema de lo que es la vida, no forman parte del corpus de la biología. De facto, no puede abrazar el concepto de vida, puesto que hablamos de un “Ding an Sich”, es decir un noúmeno. En realidad la pregunta por la vida es una pregunta por el “fenómeno de la vida”, o fenómeno vital, puesto que es lo que razonablemente podemos preguntarnos según las categorías kantianas de la razón. La pregunta por la vida que debería de ser una pregunta ontológica, pasa también a ser una pregunta epistemológica, gnoseológica, pudiendo ser cuestionada de forma fenomenológica – como objeto de cognición/de consciencia del sujeto cognoscente/consciente y como tal, “sujeto viviente”.

Mutatis mutandis, la pregunta por la cognición en sí es una pregunta irresoluble. Las ciencias cognitivas ofrecen aproximaciones que nos permiten encuadrar la cognición dentro de los procesos de percepción, de apercepción, de sensibilidad, de representación, etc. La inteligencia artificial ha evolucionado significativamente ofreciendo nuevos paradigmas de la vida artificial y sus hibridaciones orgánicas, respondiendo a la condición de posibilidad sobre conductas adaptativas clave para un desarrollo de la robótica autoorganizada. En estos estudios la encarnación de la cognición – personalmente me inclino más a hablar de “in-corporación” – es la base para el desarrollo de nuevos estudios, como la fenomenología de la cognición, o la neurofenomenología que permiten ofrecer un estudio objetivo del sujeto cognoscente. Pero la cognición sigue siendo materia de los sistemas vivos complejos, o mejor dicho de animales superiores, seres humanos y los “animats”. ¿Pero que se ha hecho de los organismos inferiores? También hasta hace muy poco se ha llegado a ver los comportamientos de las abejas y de las hormigas y otros invertebrados más allá de los agregados etológicos. El estudio de sistemas complejos nos permite ver lo que en fenómeno de colectividad emerge como cooperatividad, incluso se puede hablar de inteligencia colectiva, poniendo en jaque el egoísmo del gen del que tan orgullosos estamos.

Pero si íbamos hacia más abajo, hacia los organismos primitivos, carentes de sistema nervioso, entonces el fenómeno de la cognición se había esfumado. No encontrábamos razón de ser para hablar de dicho fenómeno. Pero fue Humberto Maturana, que en 1970,

dejó suelta una afirmación que ha traído cola. En su libro “Biology of Cognition”, en su página 13 dice específicamente: “Los sistemas vivos son sistemas cognitivos y el proceso de vivir es un proceso de cognición. Esta afirmación es válida para todos los organismos, tengan o no sistema nervioso”.

La afirmación de Maturana establece la condición de co-emergencia entre la autopoiesis y la percepción del medio circundante como un proceso cognitivo que identifica con los procesos autopoieticos en los organismos biológicos, tanto en los seres unicelulares como pluricelulares.

A esta afirmación, Maturana añade un segundo punto referente a los procesos cognitivos:

“Si un sistema vivo entra en una interacción cognitiva, su estado interno se cambia de una manera relevante para su mantenimiento, y éste entra en una nueva interacción, sin pérdida de su identidad. En un organismo sin un sistema nervioso (o su equivalente funcional) sus interacciones son de naturaleza química o física (una molécula es absorbida y se inició un proceso enzimático, o un fotón es capturado y se lleva a cabo un paso en la fotosíntesis). Para tal organismo las relaciones sostenidas entre los eventos físicos quedan fuera de su dominio de interacciones”.

Es decir que los procesos cognitivos en organismos sin sistema nervioso son plausibles y que, aunque las interacciones sean de naturaleza físico-química, su proceso cognitivo esta fuera de dicho dominio, más bien sostiene una relación significativa para el proceso autopoietico. Esta relación principalmente es de emergencia para un observador cognoscente que estudie el fenómeno. De otro modo no hay aperccepción de la cognición alguna, ni por observadores que tomen conciencia de lo apercibido ni por los propios organismos. De hecho es el problema de Tomas Nagel sobre el murciélago extrapolado a cualquier organismo: ¿cómo ser un organismo, siendo dicho organismo?

Mi hipótesis de partida se basa en que los procesos cognitivos pueden ser identificables en los organismos sin sistema nervioso. No me pregunto por la cognición en sí, sino por los procesos que la facultan, que permite que se automantenga y que se enriquezca de forma “biogénica” –como lo denomina Pamela Lyon– en estos organismos carentes de cerebro.

Escogí a los mixomicetos, por determinadas razones que explico en el preámbulo y que están íntimamente ligadas a las afirmaciones de Uexküll sobre la capacidad de tener un Umwelt específico. ¿Pero que Umwelt va a percibir un organismo que no puede representarse en su interior el entorno que le rodea, y menos, cómo va a haber “portadores de significación” (en términos uexküllianos) en el entorno? ¿Pueden acaso distinguir aquello que es fundamental para su pupervivencia de aquello que no lo es? ¿Cómo perciben? ¿Cómo son las transducciones de señales del exterior para una ameba? No sólo bioquímicamente hablando (que es complejo pero asumible en el desarrollo de la biomedicina y la microbiología), sino desde la perspectiva de una semiótica aplicada a las características biológicas de los propios organismos. Me he

centrado en los mixomicetos, concretamente en el plasmodio *Physarum polycephalum*, por su carácter excepcional se der un organismo unicelular gigante, pero plurinucleado, con unas capacidades aún más excepcionales todavía. No obstante está presenta su compañero pseudoplasmodio, pluricelular, no menos excepcional, el *Dictyostelium discoideum*. También hago referencia inevitablemente de los procariotas más conocidos como la *Escherichia Coli*.

He desarrollado mi trabajo dividiendo en dos los aspectos fundamentales del estudio:

La primera parte, va de la epistemología hacia los organismos. Es decir partimos específicamente desde la teoría del conocimiento y las disciplinas científicas. Comienzo con los fundamentos de la biosemiótica, para seguir con la fenomenología de la cognición en biología.

Luego profundizamos en los subsistemas, conteniendo ejemplos concretos de los organismos y sus componentes internas, fundamentalmente del citoplasma. De este modo pretendemos enfocar la plausibilidad de un discurso sobre la “proto-cognición” en dichos subsistemas (agentes proto-celulares e intracelulares y fenómenos de estabilidad, tanto estructurales como homeodinámicos).

De este estadio pasamos al fenómeno de biocomunicación para hablar de la mecanotransducción de señales como fase fundamental para la “toma de decisiones” y su capacidad de discriminar para tomar sentido endógenamente de lo que pasa exógenamente.

De aquí pasamos al estudio de la biología cognitiva, desde la perspectiva de la fenomenología. Esto conlleva una aproximación histórica que nos permite ver las conceptualizaciones en biología teórica y experimental de los primeros enfrentamientos sobre la concepción de la cognición – entendida antes como “psicología”.- de los protozoos y de cómo su discurso, al igual que el de Uexküll no ha perdido vigor (salvando las distancias diacrónicas de dichos discursos científicos que, siendo hijos de su época, merecen una atención considerable). Luego pasamos a los fundamentos no representacionistas de la cognición para situar el discurso en el encaje adecuado a la realidad de los organismos. Y al final hablamos de la biología cognitiva y los principios mínimos cognitivos que estructuran el estado de la cuestión sobre su plausibilidad en los organismos sin sistema nervioso, y que, de hecho, es la tesis en cuestión.

La segunda parte va de los organismos a la epistemología desde su desarrollo metodológico de investigación. Para ello hemos priorizado dar a conocer brevemente qué es un mixomiceto y más concretamente el plasmodio *Physarum polycephalum*, sus fundamentos fisiológicos y morfológicos que hacen que sean unos organismos excepcionales.

Luego hemos partido de una breve historia de los mixomicetos desde la historia de la biología, de la micología, hasta la actualidad, que forma parte de la protistología.

A partir de este momento el desarrollo de las investigaciones va en concordancia con la cuestión sobre la condición de posibilidad de cognición, ofreciendo interesantes y excepcionales desarrollos que permiten, como mínimo cuestionarnos profundamente por una formulación más categórica del fenómeno de la agencia con el marco de la cognición como parte indiscutible del asunto.

La cuestión no puede quedar resuelta, tampoco se pretende. Más bien el objetivo es su correcto encaje dentro de las disciplinas correspondientes, y ofrecer una orientación, coherente y constructiva del fenómeno de la cognición, que no es tautológica al fenómeno de la vida, pero la contiene, tanto natural como artificialmente. O como nos dice Aristóteles,

*“estar en un sujeto significa aquello que se da en una cosa/sujeto concreto (πρᾶγμα) sin ser parte separable (μέρος) suya, no pudiendo existir fuera (χωρίς) de aquello en lo que está”* (Categorías, II, 1ª 24- 25).

Palabras clave: Cognición, biosemiótica, transdisciplinariedad, Physarum Polycephalum, principios mínimos cognitivos, semántica molecular, tensegridad, buffer, biogénico, autopoiesis, biohermenéutica, biología de sistemas, regulación, agencialidad, conducta adaptativa, enactividad autopoietica, encaje teleonómico, organicismo cualitativo, proto-qualia.

# Capítulo 1. La Biosemiótica como marco de referencia

## Prolegómenos para una biología fenomenológica

Después de los estudios efectuados en los múltiples campos de la biología evolutiva y del desarrollo, en torno a la comprensión de los organismos como sistemas abiertos a equilibrios complejos (Prigogine 1955 / 1961, 1977), se ha llegado a la conciliación de la concepción de autoorganización en los sistemas vivos (Eigen 1971) con la producción de sus componentes, y con la autoreferencia de los mismos, en función de la percepción del medio inmediato y de su sistema estructural. Dicha conciliación entre la autoorganización y la autoproducción de sus componentes autoreferenciados, se han identificado como sistemas autopoieticos (Maturana y Varela 1974, 1994).

Esta conciliación ha ayudado no tan solo a establecer una idea de complejidad jerárquica de la organización (Pattee 1973; Salthe 1985, 2009) como agente autónomo en orden biológico al límite del caos (Kauffman 1990, 1991; Barandiaran, Di Paolo y Rohde 2009)<sup>37</sup>, sino que también ha puesto en consideración la apertura hacia una comprensión de la fenomenología de los organismos vivientes desde su propia pulsión (Varela 1992), fundamentadas en las ideas de Uexküll (Maturana 1996; Weber y Varela, 2002)<sup>38</sup>.

Ahora bien, mientras que Uexküll defendió en su Teoría Biológica que los organismos vivos, son vivos, y que esta premisa no podía omitirse en la constitución fisiológica como organicista de la biología de su momento, Maturana y Varela sostienen que los organismos vivos son maquinas, evitando en todo momento que fuesen entendidos como defensores del vitalismo.

Aunque esto lo trataremos más adelante, no es necesario que se conciba tanto el estructuralismo vital de Uexküll como el mecanicismo de Maturana y Varela como antinomias no conciliables. Ambas posturas tienen una preocupación por la

---

<sup>37</sup> Barandiaran, Di Paolo y Rohde definen el concepto de agente como un sistema que hace algo para sí mismo, de acuerdo a ciertas metas o normas sobre un entorno específico. Dicho sistema requiere de una individualidad, una asimetría de interacción con el entorno y una condición de normatividad generado por el sistema que regula la interacción internamente y enlaza directamente con los procesos de automantenimiento.

<sup>38</sup> “Como biólogo que soy, por ejemplo, desde muy pronto, antes de los nuevos desarrollos, me puse a leer a Uexküll, y estuve muy impresionado por su análisis de la relación entre el organismo y el medio ambiente. Más adelante, me hice una pregunta que, por lo general parece no ser seria, hasta que no se piensa hasta su conclusión lógica - sobre todo desde que los científicos actúan como filósofos: ¿Qué es la cognición como un fenómeno biológico?”. Maturana, H. R. (1996) *Was ist Erkennen? Die Welt entsteht im Auge diciembre Betrachtens*. Goldmann Verlag. pp. 221.

“Jakob von Uexküll entiende la vida como un ‘mundo vivido’ (donde Hans Jonas prefiere la autoidentidad) [...] Por definirse a sí mismo y, de esta manera, conformarse los dominios de sí mismo y del mundo, el organismo crea una perspectiva que cambia el mundo desde un lugar neutral para un Umwelt que siempre significa algo en relación con el organismo. Los organismos se puede decir que trascienden la neutralidad de la física pura y crean lo concerniente. Sólo esta perspectiva orgánica en realidad tiene la condición de ‘mundo’, sólo esto es real, porque la vida sólo puede actuar en la forma de un mundo intencional. La vida es así siempre subjetiva en el sentido fuerte de la palabra”. Weber, A., Varela, F. J. (2002) *Life after Kant: Natural purposes and the autopoietico Foundations of biological individuality*. Phenomenology and the Cognitive Sciences, 1. pp. 97-125.

fenomenología de la organización biológica que los lleva a preguntarse por la descripción de las funciones de desarrollo y de supervivencia, sea como una “biología subjetiva”<sup>39</sup> como lo denominaba Uexküll, sea como un “estudio de la organización de los sistemas vivos en relación con su carácter de unidades”<sup>40</sup>.

A la vez que la biología ha ido profundizando de forma independiente entre los niveles estructurales (molecular, celular, bioquímica, biofísica, genética, proteómica, y de desarrollo), las fisiológico-anatómicas, y la diversidad y evolución de los organismos, también han ido necesitando de un replanteamiento interdisciplinario cada vez más complejo en el estudio de los organismos en interacción (ecología, etología y comportamiento). A medida que el estudio de la complejidad del conocimiento se ha ido ampliando, también lo ha hecho el modo de conocer. Por lo que se han establecido diferentes arquitecturas explicativas (biología de sistemas, biología modular) que van respondiendo a las cuestiones de interacción entorno – interior y las propiedades emergentes con enfoques holísticos (Kitano 2001) pero que, a su vez necesitan de nuevas conexiones interdisciplinarias (bioinformática o ciencias cognitivas, entre otras) de cara a responder a los descubrimientos que van surgiendo en la comunidad científica. Una de las necesidades con las que se ha topado desde el desarrollo teórico de la biología ha sido el poder ofrecer una interpretación coherente y consistente al múltiple desarrollo de lo vivo en todos los campos de investigación. Y el problema de dicha interpretación no ha sido resuelto aún habiéndose consolidado la teoría de la evolución de Darwin en las perspectivas de la síntesis moderna o en la evo-devo.

Dice Howard Pattee: “El problema fundamental de la teoría de los sistemas biológicos es de entender y representar las interacciones dentro de tales sistemas epistemológicos, es decir, sistemas que tengan dinámica de valor dependiente y una autodesignación con valor independiente que limita esta dinámica de manera que formen un organismo coherente”<sup>41</sup>.

A partir de los años setenta, investigadores de diversos campos estuvieron estableciendo las posibles relaciones entre las transducciones de señales moleculares y su semiótica o estudio de la comunicación entre éstas y su respuesta biológica (Florkin 1974; Krampen 1981). Pero fue en la década de los noventa cuando el concepto de biosemiótica tomó cuerpo de investigación, después de los esfuerzos contenidos del semiólogo Thomas Sebeok y del médico Thure von Uexküll durante más de treinta años para consolidar una ciencia de que conecte la comunicación y el conjunto de signos y señales que se establecen a diferentes niveles de organización biológica (desde el molecular a los supraorganismos).

---

<sup>39</sup> La primera vez que Uexküll explica el concepto de “Biología subjetiva” y de “Anatomía subjetiva” lo encontramos en (1907) *Die Umrisse einer kommenden Weltanschauung*. Die neue Rundschau 18: 641-661. Castro, O. (2009) Op. Cit. pp. 64.

<sup>40</sup> Maturana, H., Varela, F. (1994) *De máquinas y seres vivos. Autopoiesis: La organización de lo vivo*. Ed. Universitaria. Grupo Editorial Lumen (6º Ed. 2004).pp 65.

<sup>41</sup> Pattee, H.H. (1978) *Biological Systems Theory: Descriptive and Constructive Complementarity*. En G.J. Klir (ed.) Applied General Systems Research, New York: Plenum, Págs. 511-520.

## Orígenes de la Biosemiótica: el concepto de Umwelt de Jakob von Uexküll

En el anterior trabajo de investigación, traté de esclarecer los fundamentos tanto epistemológicos como biológicos de las investigaciones del biólogo marino estonio Jakob von Uexküll (1864 – 1944) respecto a su preocupación sobre qué y cómo perciben los seres vivos. La capacidad de los organismos para percibir el mundo que le rodea fue denominada por Uexküll por Umwelt. Pero el concepto de Umwelt es un concepto que está más abierto a la complejidad del organismo que percibe y que no tiene tanta relación con los sentidos que con los mecanismos sensoriales que discrimina las señales o los signos tanto de llegada como de salida.

Dicho concepto se fundamenta en otros dos. Uno es un concepto anatómico-fisiológico, la *Funktionskreis* o círculo funcional, donde recoge la descripción esquemática del instrumento preceptor y receptor del mundo circundante. El otro es un concepto teórico que es la *Planmäßigkeit* o “conformidad a plan” que confiere un elemento constructivista fundamental para comprender la teleonomía y la pregnancia armónica de la biología de desarrollo que Uexküll defendió contra toda propuesta ciega y mecánica del darwinismo de su época. Ambos conceptos los iré desarrollando y actualizando en función de la integración que quiero ofrecer con las perspectivas de la biología de la cognición que respalda mi tesis.

Para comprender qué es Umwelt, Jakob von Uexküll previamente pretende reconstruir la biología desde una perspectiva de la subjetividad; es decir, desde la experimentación del organismo vivo con la percepción del propio organismo vivo.

“Todo el mundo circundante – asevera Uexküll – forma una unidad armónica que en todas sus partes es dominada por la significación que tiene para el sujeto. Según la significación que para el animal tenga el escenario, comprende un espacio más o menos extenso, cuyo lugar, con arreglo al número y magnitud, depende de la fuerza de diferenciación de los órganos de los sentidos del sujeto correspondiente”<sup>42</sup>

Esto está fuera de la posibilidad biotecnológica tanto de la época de Uexküll, como de la nuestra. Si esto es así, entonces nos preguntamos cómo es posible conseguir aprehender el sentido de Umwelt sin necesidad de recurrir a psicologismos, cosa que el mismo Uexküll dejó claro siempre que no era acertado recurrir a la psicología animal comparativa, ni a las interpretaciones antropocéntricas sino que debía de surgir directamente de la fisiología del organismo la que nos ofrece la óptica discriminativa entre el entorno (Umgebung) y el medio circundante (Umwelt) que interacciona con el mundo interno (Innenwelt).

El mundo circundante “Umwelt” de cada organismo, así como el propio organismo, es una especie de esfera de reconocimiento del mundo exterior “Außenwelt” vivido desde

---

<sup>42</sup> Uexküll, J. von (1940) *Bedeutungslehre*. Leipzig: Verlag von J.A.Barth. En castellano: *Meditaciones Biológicas. Teoría de la Significación*. Traducción de José M. Sacristán. Revista de Occidente. Madrid, 1942. p. 26.

el propio mundo interior del organismo “Innenwelt”. Y en tanto que es percibido es decodificado según el espectro de cada círculo o circuito funcional “Funktionkreis” que el organismo tiene por cada sentido “Sinn”. La sumatoria de todos los círculos funcionales genera lo que se podría describir como un “*campo de percepción multisensorial del entorno*”. Dicho campo es intrínseco al aprendizaje individual en tanto que desarrollo ontogénico, pero también al desarrollo filogenético y, por lo tanto, dependiente de la especie. Mas este campo perceptivo multisensorial del entorno es descrito por Uexküll como “burbuja de jabón” o “Seifenblase”, un entorno cerrado donde el organismo está en el centro perceptivo del entorno “Umgebung” o mejor dicho del mundo exterior “Außenwelt”.

En la burbuja de jabón existe una dinámica de intercambio de información cuyo marco de referencia reside en el “campo de percepción multisensorial del entorno” como si fuesen procesos de homeostasis y de heterostasis en dinámicas homeoréticas<sup>43</sup> variables. Pero a su vez, hace el peso de una descripción monádica que contiene los límites de conexión y de significados para el individuo.

Hago acopio<sup>44</sup>, para el concepto de Umwelt, de la terminología de “*campo*” puesto que es utilizado de forma multidisciplinar y permite el juego lingüístico hermenéutico (tanto en el ámbito de lo objetivo como de lo subjetivo), con referencia transversal y con un sentido transdisciplinar. Acoge el fenómeno descriptivo de espacio subjetivo, en tanto que a nivel humano, es una expresión natural de la extensión del un terreno allá donde llega la vista, y donde se hace posible un cultivo. Pero en el terreno científico es el ámbito real o imaginario propio de una actividad o conocimiento. Por ejemplo, en ecología está ligado al concepto de ecosistema como extensión donde habitan multiplicidad de organismos vivos. En el ámbito de la óptica, el campo visual hace referencia al conjunto espacial de sensaciones visuales disponibles para el observador desde el punto de vista de una experiencia neurocognitiva introspectiva. Dicho concepto no debe confundirse con los objetos y fuentes de luz externos que inciden sobre la retina, ya que específicamente se refiere a lo que de ello se percibe en el cerebro del observador, y que es medido a través de la perimetría. Pero en física el concepto de campo es una magnitud vectorial (electromagnética y gravitatoria); aunque en cuántica se trata de *distribuciones* topológicas (funciones generalizadas, objeto matemático que generaliza la noción de función y de medida) que permiten asignar operadores que describen la existencia de un espacio de transformación<sup>45</sup>. Se hace referencia en música a “campo musical” cuando interactúan diferentes músicos de diferentes estilos para intercambiarse estilos musicales, o también instrumentos, aunque tradicionalmente el “campo artístico musical” hace referencia al propio “habitus” o estilo musical. Incluso

---

<sup>43</sup> Homeorético quiere decir que es una vía estable de desarrollo a lo largo del tiempo. Es un término acuñado por Conrad Hal Waddington que describe la tendencia de desarrollo o el cambio de los organismos para continuar con el desarrollo o el cambio hacia un estado determinado, incluso si altera o perturba el desarrollo.

<sup>44</sup> Castro, O. (2009) Óp. Cit. p. 126.

<sup>45</sup> Tengo en mente el sentido topológico de espacio dual, para darse espacios infinito-dimensionales como el espacio de Hilbert o espacio producto interior, como recurso para transformadas de Fourier por ejemplo.

para una teoría de la significación en lingüística, campo semántico sería su homología, es decir, un conjunto de unidades léxicas que comprenden términos enlazados entre sí por referirse a un mismo orden de realidades o de ideas. Toda explicación interdisciplinaria de campo tiene una analogía hermenéutica afín al uso analógico y metafórico de las terminologías que usufructúa Uexküll tanto gnoseológicamente como epistemológicamente. Aparte, la referencia de campo tiene inherente la de actividad. Sin una actividad interactiva como perceptual no hay campo. Es interdependiente, aunque su sensibilidad es para cada sujeto. La afinidad perceptual de campo permite la interacción y con ello la comunicación.

Uexküll comenta a la descripción del Umwelt como burbuja de jabón lo siguiente:

“Cada mundo espacial del animal, se encuentra limitado por lo que respecta a los lugares y la “distancia entre pasos” y, a aunque sean sin planes de dirección, está, sin embargo, rodeada por la pura extensión, que, como forma necesaria, precede a la creación de todo el espacio. La extensión se encuentra inmediatamente detrás de la última “distancia entre pasos”. Por lo tanto, el espacio propio de cada animal, donde quiera que pueda estar el animal, puede compararse a una burbuja de jabón que rodea completamente a la criatura en una mayor o menor distancia. La burbuja de jabón de extensión constituye para el animal el límite de lo que para él es finito, y con ello el límite de su mundo, lo que hay detrás se esconde en el infinito.”<sup>46</sup>

Cada animal, incluso cada organismo vivo Uexküll lo interrelaciona con su medio inmediato sin posibilidad de aislarlo, de vivencia “in vitro” para ser más explícitos. Cada ser vivo mantiene interrelaciona a pesar de sí mismo; es decir se mantiene vivo por la interrelación con el entorno. Por eso, cada “burbuja de jabón” es intrínseca al espectro funcional de los órganos receptores, aquellos órganos que permiten al ser vivo percibir el envolvente percibible del “*Umgebung*” y que lo transforma en “*Merkwelt*”, el mundo perceptible. Dicho “*Merkwelt*” es un espectro de percepción que el individuo decodifica de sus órganos preceptores “*Merkorgane*” que permiten decodificar, registrar, almacenar los inputs percibidos de los “portadores de características ‘percibibles’” (*Receptor Merkmalträger*) Pero también la “burbuja de jabón” es intrínseca a las condiciones de posibilidad efectora del organismo. Los órganos efectores “*Wirkorgan*” que permiten la acomodación, o la locomoción o la cinética o el alcance de los elementos del “*Merkwelt*”. Este Uexküll lo denominó “*Wirkungswelt*” o “mundo de los efectos”. Ambos “*Merkwelt*” y “*Wirkungswelt*” complementan la experiencia del “Umwelt” definible como “*milieu*” o “mundo circundante” del ser vivo. Todo este complejo desarrollo de intercambios de señales y su amplificación o desarrollo lo explicaremos con detalle con el concepto de círculo o circuito funcional.

---

<sup>46</sup>Uexküll, J. von (1920 / 28) *Theoretische Biologie*. 1. Aufl. Berlin, Gbr. Paetel / 2.gänzl.neu bearb. Aufl. Berlin: J. Springer, 253. Traducción en inglés: (1926) *Theoretical Biology*. (Transl. by D. L. MacKinnon. International Library of Psychology, Philosophy and Scientific Method.) London: Kegan Paul, Trench, Trubner & Co. xvi+362. p. 42.

Lo interesante es el hecho que cualquier elemento de un “*Umgebung*” no es un objeto. Para que un elemento del “*Umgebung*” sea un elemento del “*Merkwelt*” ha de ser decodificable. Una imagen, un sonido que confiere, como dice Uexküll, un “complemento”, es decir componentes o signos decodificables (*Wirkzeichen*) por los órganos efectores podrá ser un “portador de significado”, es decir, un objeto percibido como tal, es identificado.

“Todo cuanto conviene a la esfera de un mundo circundante es transformado y modificado hasta que deviene el *portador de significación utilizable* o, en el caso contrario, *es totalmente abandonado*. Los componentes primitivos son con frecuencia separados toscamente, sin consideración al plan de estructura (*Bauplan*) que hasta entonces dominaba.

Tan diferentes son, según su contenido, los portadores de significación en los diferentes mundos circundantes, como iguales respecto de su estructura. Parte de sus propiedades sirve siempre al sujeto de portadora de un signo perceptivo, otra de portadora de un signo de efecto”<sup>47</sup>

Es muy interesante este pasaje de “*Bedeutungslehre*” (Teoría de la Significación) donde el proceso de transformación del “*Umwelt*” es acorde a un proceso funcional y significativo de los objetos que están presentes en el campo de percepción y de acción que es esta “burbuja de jabón” espacial. Si no es utilizable o funcional es abandonado de la percepción. Este “abandono” es *selectivo*.

Por lo que podemos observar que los elementos del *Umwelt* son portadores de significación que dependen de variables tanto orgánicas como funcionales. En el momento que la variable funcional, supongamos el hambre, se modifica (por saciedad, por ejemplo), entonces el elemento del *Umwelt* puede dejar de ser portador de significación – de forma contingente – y no pertenecer por lo tanto, al conjunto de elementos del *Umwelt*. Ahora bien, la variable si es orgánica, puede ser un condicionante de adaptaciones o mejor dicho de adecuaciones al entorno para alcanzar mayor información del mismo y evitar (o favorecer, según convenga) retracciones motiles, o incluso esquivar peligros para con su supervivencia.

### **Los circuitos funcionales, la conformidad al plan y el “encaje teleonómico”**

Uexküll aborda la construcción de la realidad a partir del patrón biológico de la percepción de cada organismo en su medio natural – también llamado “conformidad a plan” –, esto es, las relaciones entre la subjetividad perceptiva y el entorno. El ciclo funcional entre el entorno y las estructuras de percepción del organismo crea las condiciones de la construcción de la realidad, el mundo subjetivo de los distintos organismos. De este modo, Uexküll analiza la vida de los seres vivos y su interacción en la formación de agregaciones grupales organizadas. La confirmación de la realidad envolvente es una expresión subjetiva que cada organismo construye a partir de su

---

<sup>47</sup> Uexküll, Jakob von (1942) *Meditaciones Biológicas. Teoría de la Significación*. Opus Cit. pp. 26-27. Paréntesis y cursivas son mías.

facultad perceptiva; construcción posible gracias a los signos. La ausencia de signos es el silencio, la pérdida del sentido y del orden. No se puede ver como realidad algo sobre lo que no existe conceptos/signos previos. La habilidad de los seres vivos en la interpretación de su entorno determina la amplitud de sus mecanismos de supervivencia, su capacidad de adaptación y de evolución.

Esta línea de investigación sobre la percepción del medio circundante y el mundo interno de los organismos viene fundamentada por dos líneas de estudio desarrolladas por dos de sus maestros del pensamiento biológico: Karl Ernst von Baer y Johannes Müller.

De von Baer, Uexküll desarrolla uno de los conceptos más importantes para el estudio de la fisiología de la percepción: la percepción del tiempo o “longitudes de momento” de los organismos vivos<sup>48</sup>. Algunos de ellos fueron estudiados por Uexküll a través de la cronofotografía desarrollada por Etienne Jules Marey<sup>49</sup>. Uexküll demostró que el tiempo no es un fluido continuo, sino que está “cuantificado” perceptualmente, a través de lo que en la actualidad llamamos “frame” o número de imágenes por segundo (Nikolaev et al 2010; Freeman 2007).

De Johannes Müller (1801-1858), Uexküll desarrolla la ley de Müller<sup>50</sup> que contempla que un tipo de sensación que sigue a la estimulación no depende del modo de estimulación sino de la naturaleza del órgano sensitivo. Con esto Müller defendería la que sería denominada “ley de energía específica de los nervios” y que actualmente está en debate (Norsell, Finger y Lajonchere 1999)<sup>51</sup>.

A parte de elaborar unas investigaciones fisiológicas fundamentales para el estudio de la percepción de los invertebrados marinos, Uexküll desarrolló a través de Müller y de von Baer el primer estudio científico de lo que llamaría una “biología subjetiva”<sup>52</sup>. El concepto de subjetividad en biología, Uexküll lo traslada tanto en la anatomía como en

---

<sup>48</sup> “La vida interior de un ser humano o de un animal, durante el mismo tiempo externo [periodo], pasa más rápido o más lento, y esta vida interior es el estándar con el que medimos el tiempo al observar [los procesos en] la naturaleza”. Baer, K. E. von. (1864). *Welche Auffassung der lebenden Natur ist die richtige?* En K. E. von Baer (Ed.), *Reden gehalten in wissenschaftlichen Versammlungen und kleinere Aufsätze vermischten Inhalts*. Theil 1: Reden (pp. 257-258). St. Petersburg: Schmitzdorff. En: Wackermann, J., *Inner and Outer Horizons of Time Experience*. The Spanish Journal of Psychology. 2007, Vol. 10, No. 1, 20-32.

<sup>49</sup> Uexküll conoció a Marey en 1899, cinco años antes de su muerte. Uexküll le compró a Marey una cámara cronofotográfica para estudiar tanto el movimiento de los animales invertebrados marinos (estrellas de mar, erizos, pulpos, etc.) como a mariposas. Castro, O. (2009) *Jakob von Uexküll: El concepto de Umwelt y el origen de la biosemiótica*. Trabajo de investigación para la obtención del DEA. Departament de Filosofia, Universitat Autònoma de Barcelona. p. 137.

<sup>50</sup> Müller, J. (1826) *Zur vergleichenden Physiologie des Menschen Gesichtssinnes des der Tiere*. C. Knobloch, Leipzig.

Müller, J. (1838) *Handbuch der Physiologie des Menschen für Vorlesungen*. Hölscher J., Koblenz

<sup>51</sup> Ortiz de Zárate, A. (2000) *Teorías sobre la conciencia en los últimos años*. Revista de historia de la psicología. Vol. 21, Nº 2-3, pp. 341-348.

Norsell, U., Finger, S., Lajonchere, C. (1999) *Cutaneous sensory spots and the “law of specific nerve energies”*: history and development of ideas. Brain Research Bulletin. Vol 48 (5) pp. 457-465.

<sup>52</sup> Uexküll, J. von (1907) *Die Umriss einer kommenden Weltanschauung*. Die neue Rundschau 18, 641-661.

la fisiología. Incluso estuvo muy implicado en el problema del protoplasma como principio biológico que permite la diferenciación perceptiva entre el entorno decodificable (Umwelt) y el interior del organismo unicelular (Innenwelt) (Uexküll 1909). La actualización conceptual de la insistencia de Uexküll en referencia a la subjetividad de la biología es epistemológicamente tautológica a una fenomenología de la biología que concordaría con los pensamientos de Edmund Husserl y de Aron Gurwitsch<sup>53</sup>, que reconocería Merleau-Ponty y Kurt Goldstein y que llevaría a cabo Francisco Varela y Humberto Maturana.

Uexküll recogerá también de von Baer y de Müller dos aspectos gnoseológicos de la biología que vinculan el aspecto subjetivista – fenomenológico de los estudios experimentales. Por parte de Müller está la fundamentación kantiana de las formas apriorísticas de la percepción y que actualmente la cuestión se mantiene vigente (Langston et al 2010; Palmer y Lynch 2010; Willis et al 2010). En el caso de la influencia de von Baer, Uexküll recoge la idea kantiana de la *planificación según lo previsto* o “Zielstrebigkeit”<sup>54</sup>, comprendiendo el sentido del tiempo como procesos de la vida, formando parte de la construcción de los organismos. Uexküll toma dicha *planificación según lo previsto* de von Baer y la enlaza con la concepción teleológica kantiana de la *conformidad a un fin* “Zweckmäßigkeit” de la Crítica del Juicio (Kant 1786 - 1790), para conjugar una conciliación de propósitos tanto temporales como morfológicos – o de distribución espacial – como una *conformidad a plan* o “Planmäßigkeit” (Uexküll 1920; 1928; 1973). De esta forma quiso abrir un campo de estudio científico de la anatomía y la fisiología subjetiva que permitiera estudiar el *porqué los seres vivos perciben el entorno de acuerdo a la estructura de su órgano perceptivo y de su sensibilidad* (bio-físico-químico) Ante este estudio, Uexküll no sólo renunció epistemológicamente a un reduccionismo, sino que entrevió lo que 30 años más tarde se denominaría la teoría de sistemas abiertos. Ésta teoría la fundó Ludwig von Bertalanfy, y que, a su vez refundó lo que sería el organicismo y la autoorganización de los sistemas vivos, como sistemas abiertos<sup>55</sup>.

Dicho organicismo que Uexküll desarrolló tuvo su centro de gravedad en el estudio de la subjetividad fenomenológica. Cabe pensar que su atención se centró en la cuestión viva de la organización biológica más que su componente reductible fisicalista. Dicho pensamiento, acompañado por la fundamentación teleológica interna de los seres vivos, apoyó el desarrollo de una visión que el profesor Timothy Lenoir<sup>56</sup> de la Universidad de

---

<sup>53</sup> Pintos-Peñarada, M. L. (2002) Aron Gurwitsch: *Fenomenología de la percepción y encuentro con Kurt Goldstein*. Phainomenon. Revista de Fenomenología 14 (2007), 255-277 / para la versión online: Investigaciones Fenomenológicas 6 (2008), 327-355, [http://www.uned.es/dpto\\_fim/invfen/InvFen6/17\\_mluz.pdf](http://www.uned.es/dpto_fim/invfen/InvFen6/17_mluz.pdf)

<sup>54</sup> Baer, K. E. von (1864) *Reden gehalten in wissenschaftlichen Versammlungen und kleinere Aufsätze vermischten Inhalts*. Schmitzdorff. St. Petersburg. Vol I. Sobre todo el capítulo —Welche Auffassung der lebenden Natur ist die richtige? Und wie ist diese Auffassung auf die Entomologie anzuwenden? pp. 237-284.

<sup>55</sup> Castro, O. (2009) Opus Cit. p. 67.

<sup>56</sup> Lenoir, T. (1980) *Kant, Blumenbach, and Vital Materialism in German Biology*. Isis 71: 77-108.

Lenoir, T. (1982) *The Strategy of Life: Teleology and Mechanics in Nineteenth-Century German Biology*. University of Chicago Press

Arizona denomina “*teleo-mecanicista*” o “*vitalismo-materialista*”. Uexküll compartió gnoseológicamente la idea del vitalismo de Hans Driesch, pero que no la aceptó epistemológicamente como metodología científica<sup>57</sup>, pues se decantó por ser un precursor de un desarrollo constructivista de la biología fenomenológica como una orientación paralela a la *conformidad a plan*, que constituye uno de los ejes de su biología teórica.

Esta conformidad a plan o “*Planmäßigkeit*” describe una determinada disposición de las diferentes partes de un organismo que hacen de él una unidad. Este plan, o Bauplan, es determinante pues, a través de su conformidad, se eslabonan las diferentes funciones para procurar la unidad de su función de conjunto. Con ello Uexküll aportaría una de las ideas más revolucionarias dentro de su pensamiento biológico: *una adecuación o encaje progresivo a los equilibrios inestables entre el medio circundante y el mundo interno del organismo, en el que la “coordinación” de las relaciones de cada círculo o circuito funcional con su mundo perceptible es el factor de desarrollo y de los patrones morfogenéticos*. Esta adecuación que denomino “*encaje teleonómico*” permite la relación entre objetivo y motivo en la epigénesis y, por lo tanto ofrece una posibilidad significativa a la *conformidad a plan* “*Planmäßigkeit*” que ofrece el despliegue genético (desde el sentido mendeliano de la herencia – tal como Uexküll aceptó el concepto de gen) sin un determinismo absolutista que determine la “*coordinación biológica*” pero que establezca la posibilidad de una cierta armonía dinámica y a su vez variable entre el Umwelt y el mundo interno o Innenwelt del organismo<sup>58</sup>.

Dicho “*encaje teleonómico*” pretende ofrecer la condición de posibilidad de comprender (o por lo menos de establecer un marco de referencia con) aquellos fenómenos emergentes de significados establecidos por determinadas nomenclaturas tanto en biología como en ciencias cognitivas, y que infieren en conatos de realidades complejas de naturaleza diferente a la subyacente que ha permitido dicha emergencia. Este concepto de “*encaje teleonómico*” lo voy a describir con mayor detalle cuando entremos en la epistemología organicista que expondré más adelante.

Por lo que podemos observar, el legado de Uexküll es rico en desarrollos que aún están necesitados de una biotecnología que permita captar determinados umbrales del conocimiento biológico de los cuales algunos de ellos no podría afirmar si van a ser descritos con la metodología que ejerce la biología experimental actual.

La necesidad de comprender al menos tanto la sintaxis como la semántica de las señales transductoras en la comunicación tanto en células sencillas como en las integrantes de un sistema más complejo (como podría ser el sistema inmunológico de un animal o el de un ser humano) son los aspectos principales de investigación de la información

---

Lenoir, T. (1988) *Kant, Von Baer, and Causal-Historical Thinking in Biology*. Poetics Today, Vol. 9, No. 1. Págs. 103-115.

<sup>57</sup> “Lo más seguro es evitarlo lo más posible”. Uexküll, Jakob v. (1934) *Ideas para una concepción del mundo*. Espasa-Calpe. Col. Biblioteca de Ideas del Siglo XX. Madrid. p. 30. En Castro, O. Opus Cit. p. 74 y 101.

<sup>58</sup> Castro, O. (2009) Opus Cit. p. 58.

significativa para los organismos y, por tanto, del Umwelt mismo de la biosemiótica actual.

### El nacimiento de la biosemiótica

El nombre de “biosemiótica” ya se acuñó por primera vez en 1962 a través de Friedrich Rothschild en un párrafo en el que incluía el siguiente texto:

“Este enfoque supone la aceptación de nuestra posición de que la historia de la subjetividad no se inicia con el hombre, sino que el espíritu humano ha sido precedido por muchas etapas preliminares de la evolución de los animales. La teoría del símbolo de la relación psicofísica llena un abismo entre estas diferentes líneas de investigación y unifica sus métodos bajo el nombre de *biosemiótica*. Hablamos de la biofísica y la bioquímica, cuando los métodos utilizados en la química y la física de la materia sin vida se aplican a los materiales y las estructuras creadas por los procesos de la vida. En la analogía usaremos el término biosemiótica. Se trata de una teoría y los métodos que sigue el modelo de la semiótica de la lengua. Investiga los procesos de comunicación vitales que expresa el significado, en analogía con el lenguaje.”<sup>59</sup>

La definición que figura en ese documento muestra el alcance y la importancia del dominio descrito por Rothschild correspondiente con el significado de “biosemiótica”, ya que ha sido utilizado más tarde por algunos científicos que no habían leído sus escritos. Del mismo modo, Rothschild afirmó que “protozoos, invertebrados, vertebrados y, por último, el hombre aparece como cuatro etapas de desarrollo de la subjetividad. En cada etapa de un nuevo sistema de signos o de señales superponen los ya establecidos y hace posible el desarrollo de un nuevo y mayor nivel de experiencia”. Su explicación es, un *equivalente homeomórfico*<sup>60</sup> a la estructura tri-cerebral (tallo-reptiliano, límbico-paleomamífero y neocortex-neomamífero) expuesta por Paul D. MacLean<sup>61</sup>.

Pero será en la década de los noventa cuando se puede decir que se formó el primer grupo de investigación biosemiótica. Otro resultado de la colaboración entre Thomas Sebeok y Thure von Uexküll fue la organización de una serie de reuniones internacionales que tuvieron lugar en Alemania, a finales de 1980 y principios de 1990, en la Clínica de Medicina Rehabilitatoria en Glottertal, cerca de Friburgo. Fue en una de

---

<sup>59</sup>Rothschild, F. S. (1962) *Laws of symbolic mediation in the dynamics of self and personality*. Annals of the New York Academy of Sciences, 96, Págs.774–784.

<sup>60</sup> Las “*equivalencias homeomórficas*” se dan cuando existen conceptos que, aún teniendo diferencias en cuanto a formas, atributos, o funciones aplicadas en entornos diferenciados, toman ciertas semejanzas semánticas o equivalencias, de tipo funcional o morfológico, que conllevan a un enlace significativo entre sí. Que sean equivalentes conlleva que sean también homólogos. Es un término acuñado por Raimon Panikkar que yo usufructué en el campo de la filosofía de la biología como una característica que supera el concepto de analogía. Castro, O. (2009) Op. Cit. pp. 191 y ss.

<sup>61</sup>Kral, V. A., MacLean, Paul D. (1973). *A Triune concept of the brain and behaviour*, by Paul D. MacLean. Including Psychology of memory, and Sleep and dreaming; artículos presentados al Queen's University, Kingston, Ontario, February 1969, por V. A. Kral [et al.. Toronto]: Ontario Mental Health Foundation .Univ. of Toronto Press.

esas reuniones, en 1990, que Sebeok se reunió con Jesper Hoffmeyer (1942), un bioquímico danés que había fundado una *Sociedad para la Semiótica de la Naturaleza*, en Copenhague, y poco después, en 1992, vino al encuentro con Kalevi Kull, que estaba organizando el Centro Jakob von Uexküll en Tartu, Estonia.

Hoffmeyer y Kull son biólogos, no semiólogos, y se incorporaron entorno a la biosemiótica en una labor plenamente interdisciplinaria que comenzó atraer la atención de un número cada vez mayor de científicos. También marcó la transición a una generación más joven, y quizá sea justo decir que el paso del testimonio de Sebeok a Hoffmeyer fue completado en 2001, cuando se realizó la primera reunión dedicada exclusivamente a la biosemiótica organizada por Hoffmeyer en Copenhague<sup>62</sup>.

Jesper Hoffmeyer lleva trabajando en la biosemiótica desde 1988 junto con Claus Emmerche<sup>63</sup>, filósofo y biólogo teórico de la Universidad de Copenhague, sobre el concepto de la dualidad del código, en referencia a la versión digital y analógica del mensaje codificado del ADN. Hoffmeyer marca la diferencia entre la autoreferencia de su mensaje y el ofrecido para el citoplasma, así como su decodificación semiótica del papel del ADN como plan de trabajo y ejecución del mismo. La información biológica de ningún modo es idéntica al gen o al ADN, como las manchas en un papel ofrecen letras, monemas, morfemas, palabras y así se jerarquiza la significación a niveles que no forman parte de la estructura física, aunque sin ella no emerge ni el signo ni el significado. Por eso la información –biológica y cultural – no forman parte del mundo de las sustancias fisicoquímicas aunque dependan de ello ya que opera en el mundo de las sustancias. “Informar” proviene del latín “informare”: “Traer algo de una forma.” Aunque tiene también el sentido de “llevar a la forma algo”, de la misma forma que “incorporar”. El propósito de Hoffmeyer<sup>64</sup> y de Emmerche era mostrar que cuando el concepto de información desoculte la distinción entre forma y sustancia, la perspectiva central de la biología cambiará fructíferamente. “La información no existe excepto la contenida por (inmanencia) en la materia y la energía.” De esta sentencia surge entonces una pregunta pertinente: ¿Cómo se pudieron constituir sistemas capaces de responder a las diferencias del entorno en un medio que desconocía toda diferencia? Primero el sistema tiene que ser capaz de construir una descripción de sí mismo tal como confirmó Howard Pattee<sup>65</sup>. Dicha función de la descripción tiene el cometido de asegurar la identidad del sistema en el tiempo (una memoria del sistema) Esta sería la autoreferencia del ARN – ADN. Pero para que ocurra el proceso de traducción (o de desarrollo), se ha de ser capaz de descifrar el código y seguir sus instrucciones. El conocimiento tácito del mismo está en la organización celular, encubierto en la descripción del ADN. Por lo que la realización en el espacio y el tiempo de las relaciones estructurales especificadas en el código digital define el tipo de diferencias

---

<sup>62</sup> Favareau, D. (2007) *The evolutionary history of biosemiotics*. En Barbieri, M. (Ed.), *Introduction to Biosemiotics*, Dordrecht: Springer. Págs. 1-67.

<sup>63</sup> Emmeche, Claus and J. Hoffmeyer (1988). *The semiotics of nature*.

<sup>64</sup> Hoffmeyer, Jesper; Emmeche, Claus 1991. *Code-duality and the semiotics of nature*. In: Anderson, Myrdene; Merrell, Floyd (eds.), *On Semiotic Modeling*. Berlin: Mouton de Gruyter, 117–166.

<sup>65</sup> Pattee, Howard (1972) *Laws and Constraints, Symbols and Languages*. En: *Towards a Theoretical Biology*, C.H. Waddington (ed.), 4, 248-258. Edinburgh: University of Edinburgh Press.

ambientales que el sistema selecciona en el Umwelt y al que responde. La astucia de la digitalización consiste en introducir espacios en el continuum y de esta manera crear límites. Estos límites, sin embargo, no pertenecen al continuum, ni forman parte de tales espacios. El límite es el lugar geométrico de una intervención externa y así, necesariamente se define un sistema “busca-meta” (*una conformidad a fin debida al plan*) que trace ese límite.

La identificación de la semiosis biológica con la semiosis de Peirce fue expuesta por Hoffmeyer en su libro “Signs of Meaning in the Universe” (1996) donde condensa su manifiesto que “la unidad básica de la vida es el signo (o también denominada señal), y no la molécula”. De esta forma consiguió una genuina continuidad del legado de Sebeok basándose en el concepto triádico de signo, pudiendo ser referente como signo biosemiótico<sup>66</sup>, superando así el modelo diádico de significado – significante de la semiología de Ferdinand de Saussure.

La función del signo consiste en ser “algo que está en lugar de otra cosa bajo algún aspecto o capacidad”. Para Charles Sanders Peirce el signo es una representación por la cual alguien puede mentalmente remitirse a un objeto. En este proceso se hacen presentes tres elementos formales de la tríada a modo de soportes y relacionados entre sí.

1. *El representamen*: Es la representación de algo, o sea, es el signo como elemento inicial de toda semiosis. El representamen es simplemente el signo en sí mismo, tomado formalmente en un proceso concreto de semiosis, pero no debemos considerarlo un objeto, sino una realidad teórica y mental.
2. *El interpretante*: Es lo que produce el representamen en la mente de la persona. En el fondo es la idea del representamen, o sea, del signo mismo. Peirce dice que “un signo es un representamen que tiene un interpretante mental”. Se trata del elemento distintivo y original en la explicación de la significación por parte de Peirce.
3. *El objeto*: Es aquello a lo que alude el representamen y – dice Peirce – “Este signo esta en lugar de algo: su objeto”. Debemos entonces, entender por objeto la denotación formal del signo en relación con los otros componentes del mismo.

Esta tríada responde exclusivamente a la relación que se establece entre el signo y el objeto en el momento de realizar un proceso de significación. Este es el motivo por el que la triada de Peirce encaja adecuadamente en los objetivos de la biosemiótica.

La literatura sobre la fundamentación del concepto de signo de Peirce en los trabajos biosemióticos es abundante. Pero fue Thomas Sebeok quien ofreció por primera vez la visión de Peirce de signo en la zoosemiosis<sup>67</sup>.

Según Alexei A. Sharov<sup>68</sup>, entomólogo, genetista y biosemiótico, la información es considerada como un microestado de un sistema que influye en la elección de unos

---

<sup>66</sup>Barbieri, M. (2009) *A Short History of Biosemiotics*. Biosemiotics Vol 2, Nº 2. Pág 221-245.

<sup>67</sup>Sebeok, T. A. (1972) *Perspectives in zoosemiotics*. The Hague: Mouton.

sistemas de trayectorias hacia puntos de bifurcación. El sentido (sense) de la información tiene dos componentes: un significado o propósito (meaning) y un valor o importancia (value). El sentido es una colección de prohibiciones y limitaciones para la información sobre las trayectorias de un sistema de desarrollo y de conductas; y el valor es medido por la contribución de información hacia la seguridad del automantenimiento y la autoreproducción del sistema. Significado y valor son considerados como el nivel material e ideal. El sentido de la evolución se caracteriza por su extensión abierta en el espacio-tiempo y por la complicación de su estructura. Su sistema va gradualmente del sistema pre-biológico hacia el hombre.

### **En defensa de las tesis sobre la Biosemiótica.**

En 1994 Jesper Hoffmeyer desarrolló el concepto que Yuri Lotmann denominó como “semiosfera”<sup>69</sup> aplicada a la línea de investigación biosemiótica<sup>70</sup>. El concepto semiosfera es una homología de la “*noosfera*” de Vladimir Vernadsky<sup>71</sup>, creada a través de los registros de los cambios paisajísticos geológicos de zonas mineras y de los pueblos de los alrededores. Se introdujo el concepto a nivel global del planeta ofreciendo un entorno de la atmósfera donde se da la variedad de la vida y se la denominó “*biosfera*”<sup>72</sup>. La semiosfera penetra todas estas esferas consistiendo en la comunicación entre las señales sean químicas o de radio, campos eléctricos, sonidos, olores, lumínico, etc. La semiosfera plantea entonces limitaciones o condiciones fronterizas de Umwelten de la poblaciones, ya que estos se ven obligados a ocupar lo que Hoffmeyer llama “nicho semiótico” y que Jakob von Uexküll lo había denominado como “contrapunto” según las reglas de significación que interrelacionan diferentes Umwelten o mundos circundantes subjetivos, interrelacionados por necesidad de

---

<sup>68</sup> Sharov, Alexei. A., (1992), *Biosemiotics: A functional-evolutionary approach to the analysis of the sense of information*, in T. A. Sebeok and J. Umiker-Sebeok (eds.), *Biosemiotics: The Semiotic Web 1991*, Mouton de Gruyter, Berlin, pp. 345-374.

<sup>69</sup> Lotman, Y. M. (1990) *Universe of the mind. A semiotic theory of culture*, I. B. Taurus and Co., London.

<sup>70</sup> Hoffmeyer, Jesper, (1994), *The Global Semiosphere*, Paper presented at the 5th IASS congress in Berkeley, June 1995. In Irmengard Rauch and Gerald F. Carr (eds.): *Semiotics Around the World. Proceedings of the Fifth Congress of the International Association for Semiotic Studies*. Berkeley 1994. Berlin/New York: Mouton de Gruyter 1997, pp. 933-936.

<sup>71</sup> Vladimir Ivanovich Vernadsky (San Petesburgo 1963 – Moscú 1945) fue un minerólogo y geoquímico ruso, de nacionalidad ucraniana. Popularizó el concepto de “biosfera” de Eduard Suess, acuñado en 1885, en la que se generó la hipótesis de que la vida es la fuerza geológica que da forma a la Tierra. La “noosfera” es la tercera etapa en el desarrollo de la tierra, después de la “geosfera” (materia inanimada) y la “biosfera” (vida biológica). Así como el surgimiento de la vida ha transformado fundamentalmente la “geosfera”, la emergencia del conocimiento humano ha transformado fundamentalmente la “biosfera”. En esta teoría, los principios de la vida y de la cognición son características esenciales de la Tierra, la evolución, y debe haber estado implícito en la Tierra todo el tiempo. Este análisis sistémico y geológico de los sistemas vivos complementa la teoría de Charles Darwin de la selección natural, que examina a cada especie, aunque no en su relación con un principio de subsunción.

<sup>72</sup> El primer uso del término “noosfera” es realizado por Édouard Le Roy, quien junto con Teilhard de Chardin estaba escuchando las conferencias de Vladimir Vernadsky en la Sorbona. En 1936 Vernadsky aceptó la terminología de la noosfera en una carta a Boris Leonidovich Lichkov (sin embargo, afirma que el concepto se deriva de Édouard Le Roy). Vernadsky V.I. (1936/1997) *Scientific Thought as a Planetary Phenomenon*, Nongovernmental Ecological V.I. Vernadsky Foundation, Moscow. Le Roy E. (1927) *L'Exigence Idéaliste et le Fait de l'Évolution*. Boivin et Cie, Paris. Levit, G. S., Olsson, L. (2006) *"Evolution on Rails". Mechanisms and Levels of Orthogenesis*. Annals for the History and Philosophy of Biology, Vol. 11. pp. 97-136.

supervivencia (básicamente depredador / presa). El desarrollo de los aspectos tanto horizontales como jerárquicos, a nivel interno o externo del organismo, en micro medidas o en macro medidas o escalas, todas ellas comprenden una regla respecto a las actividades repetitivas o hábitos de comunicación: Siempre que se ha desarrollado un hábito allí también existe un organismo para las que este hábito se convierta en un signo o una señal.

Con ello Hoffmeyer describió las primeras ocho tesis que completan el sendero histórico vigente de la biosemiótica<sup>73</sup>. Las ocho tesis (en versión simplificada) son las siguientes:

1. Los signos son las unidades básicas del estudio de la vida.
2. La entidad más simple con competencia semiótica es la célula.
3. La “subjectualidad”<sup>74</sup> es un fenómeno gradual.
4. Los sistemas vivos se caracterizan por producir signos en procesos de interacción por el cual los hábitos significativos conducen a la producción recurrente de nuevos hábitos, etc.
5. Los cuerpos vertebrados funcionan con una dinámica de enjambre semejante a la de los insectos sociales.
6. El enjambre de células que constituyen el cuerpo humano ha de verse como un enjambre de enjambres.
7. El cerebro está integrado funcionalmente en el cuerpo: enjambre de células inmunitarias interactúan con enjambres de células nerviosas en el mantenimiento de la ecología somática.
8. Pensamientos y sentimientos no son entidades localizables: emergen (*they swarm out*) del nuestro colectivo corporal.

De hecho, las ideas fundamentales de la biosemiótica actual, investigada por la escuela de Copenhague / Tartu de biosemiótica y el Jakob von Uexküll Centre de Tartu han sido extractadas en 2002 por el Dr. Frederik Stjernfelt profesor de biosemiótica de la Universidad de Aarhus (Dinamarca), a través de los trabajos realizados por Jesper Hoffmeyer y que Stjernfelt denominó “*Tactatus Hoffmeyerensis*”<sup>75</sup> y son las siguientes:

1. Los signos y la vida son coextensivos<sup>76</sup>.
2. Dado que la biología es una ciencia histórica (quizás incluso la ciencia histórica por excelencia) se clama por una historia natural del significado.

---

<sup>73</sup> Hoffmeyer, J (1995) *The swarming body*. En: Rauch I., Carr, G. F. (eds.): *Semiotics Around the World. Proceedings of the Fifth Congress of the International Association for Semiotic Studies*. Berkeley 1994. Berlin/New York: Mouton de Gruyter 1997, pp. 937-940.

<sup>74</sup> Hoffmeyer utiliza el neologismo “subjectness”. Con ello indica la acción con la que el sujeto crea un mundo propio (creándose a sí mismo con él) evitando de este modo la connotación solipsista que tiene la subjetividad. Stepke, F. L., (1997) Más allá del cuerpo. Editorial Andrés Bello. Pág. 56

<sup>75</sup> Stjernfelt, F. (2002) *Tractatus Hoffmeyerensis*. *Signs Systems Studies*, Vol 30.Nº 1. Págs. 337- 345.

<sup>76</sup> Esta idea es el corazón de la biosemiótica actual obtenida de otra frase de Thomas Sebeok que afirma que “*la semiosis es el corazón de la vida*” en Sebeok, Thomas A (1991) *A Sign is Just a Sign*. Bloomington: Indiana University Press. Pág. 85. O también “*Semiosis presupone vida*” en Sebeok, Th. A. 2001. *Global Semiotics*. Bloomington: Indiana University Press.

3. Dado que la biología es una ciencia estructural (quizás incluso la ciencia estructural por excelencia) se clama por un inventario de conceptos de la biología estructural.
4. Si aceptamos el equilibrio puntuado como una estructura básica en la evolución biológica, hay que esperar que la evolución semiótica siga la misma estructura, lo que muestra una escala de incremento de tipos de signos complejos.
5. Las formas básicas de los signos biológicos son los que intercambian entre el organismo y su entorno, su Umwelt, en un círculo funcional, con sus signos o señales de acción (*Wirkzeichen*) y signos o señales de recepción (*Merkzeichen*) respectivos tal como Uexküll describió.
6. El Umwelt en las formas más complejas de vida, no está determinado a través ni por medio de la genética, sino que debe de estar formado en cada caso por la *selección individual de rutas en su propio paisaje de creodos*<sup>77</sup>, *bajo la impresión de la interacción con el medio envolvente*.
7. Semejante Umwelt basada en la experiencia, se hace posible una asimilación genética (Conrad H. Waddington) porque los individuos con mejores bases genéticas tendrán una mayor ventaja en la selección. Este efecto Baldwin<sup>78</sup> será especialmente eficaz en animales sociales donde un individuo puede aprender tales competencias del Umwelt de los demás.
8. En general, cualquier hábito tomado como tal expone al organismo a nuevos desafíos en una cadena sin fin de interpretaciones.
9. El papel de la selección sigue siendo decisivo, pero los fenómenos biológicos básicos como la multiplicación, así como el orden, son requisitos previos para la selección y, por tanto, no pueden ser productos de la misma. La multiplicación y el orden son de por sí significativos.
10. Ambos son, por la tanto, más primitivos que los genes y se refieren a la versión análoga del doble código del organismo: el digital, es decir, la información genética de una parte; y la analógica, es decir, la información morfológica, por otra parte, proveniente de la arquitectura y el metabolismo de la célula, así como la estructura multicelular y la comunicación.
11. Otro requisito previo para el círculo funcional de un organismo es el carácter del organismo como una agencia equipada con un punto de vista. Esto puede ser definido como una “integración estable de auto-referencia y referencia de otros.”<sup>79</sup>

---

<sup>77</sup> El término creodo, del griego chre (destino) y hodos (camino), es un neologismo procedente de la biología epigenética de Waddington (1957) y se refiere a la trayectoria relativamente estable del desarrollo de las especies, causado parcialmente por la evolución de las secuencias de control jerárquico del genotipo. Dicha evolución no se estabiliza en un punto determinado (no es homeostática), sino en una única vía estable de desarrollo a lo largo del tiempo (es homeorética). El desarrollo creódico del sistema supone que las influencias del entorno tendentes a sacarlo de su trayectoria serán neutralizadas por su autorregulación, de forma que dicho sistema volverá a su trayectoria habitual. Waddington, C. H. (1957) *The Strategy of the Genes*, George Allen & Unwin. pp 19-30.

<sup>78</sup> El efecto Baldwin, también llamado evolución baldwiniana u ontogenética es una teoría evolutiva propuesta en 1896 por el psicólogo norteamericano James Mark Baldwin, quien propuso un mecanismo para la selección de habilidades de aprendizaje. La descendencia seleccionada tendería hacia una mayor capacidad para aprender nuevas habilidades y no estar constreñida a habilidades genéticamente codificadas y relativamente fijas, poniendo el énfasis en el hecho de que el comportamiento sostenido de una especie o grupo puede modelar la evolución de las especies. Fuente: Wikipedia®.

<sup>79</sup>Hoffmeyer, J. (1999) *Order out of indeterminacy*. Semiotica 127(1/4): 321–343. Pág. 332.

(El anterior mantenimiento y definición de sí mismo como tal; éste último facilita su orientación y la supervivencia en su Umwelt)

12. La agencia presupone, a su vez, la existencia de una definición de los límites “dentro-fuera”, una membrana, que caracteriza a todas las formas de vida (salvo determinados parásitos marginales como los virus) Las membranas, por tanto son fundamentales para hacer posible la asimetría entre el organismo y el medio circundante, y facilita el tráfico restringido a través de la frontera de la membrana en forma de signos o señales. El cierre autocatalítico de bucles de reacciones químicas en la sopa primigenia provoca la necesidad de un nuevo cierre topológico de la membrana con el fin de dar lugar a los organismos. El control del tráfico, a través de la membrana permite la emergencia de un límite de “interior-exterior” estricto (debido a la *percepción* en un sentido amplio de la palabra) en el organismo, así como “exterior-interior” (debido a su *interacción* y de su influencia con aspectos específicos del medio ambiente)
13. Dichos signos integrados en el organismo en su Umwelt ecológico comprenden otros organismos con su propios Umwelten. Un mutualismo mucho más generalizado que una estricta simbiosis cuyas formas Uexküll definió como “una sinfonía natural” de la comunicación mutua entre las especies y de éstos con su entorno.
14. Esta comunicación implica necesariamente, por razones de economía, una “percepción categorial”. Fenómenos ligeramente diferentes son funcionalmente percibidos como del mismo tipo. Éste es probablemente el más bajo o el más simple fenómeno semiótico, basado en sobre las diferentes formas de “sitios activos” en el exterior de las macromoléculas que pueden ser reconocidas por estos sitios como otras moléculas. De la misma manera, otras moléculas con los mismos sitios pueden engañar el proceso en cuestión. Este es un fundamento bioquímico de la indeterminación biológica o “libertad semiótica”, que requiere de un proceso cíclico teleológico (sea funcional, finalidad, propósito, metabólico, homeostático o el predicado que se prefiera), a fin de mostrar sus posibilidades.
15. La biología es imposible sin el cuarteto aristotélico de las causas. Las *causas finales*, sin embargo, no se identifica con los propósitos (que forman un subconjunto especial de ellos), sino que debe de ser identificados como *todos los procesos que son atraídos por un futuro estado*. Estados futuros que son sólo en general (Peirce) causas finales que pueden hacer uso de la representación de dichos estados por medio de los tipos.
16. Dado que solo sabemos que son bastante complicadas las formas de vida (células compuestas internamente de orgánulos que probablemente formaron simbióticamente los organismos eucariontes), estos primitivos procesos semióticos también caracterizan el metabolismo interno de las células.
17. El papel de los genes parece ser el de controlar los procesos metabólicos y epigenéticos en el organismo (no la de crear o determinar a través y por medio de ellos). Esto apunta al hecho de que los genes pueden ser un especial y un exitoso ejemplo de una noción más general de “andamiaje”, es decir, la estabilización y

- canalización de (una parte de) el metabolismo. Otros podrían ser andamiajes de arquitectura celular, la estructura del órgano, el lenguaje, la escritura...
18. En el extremo superior de la historia natural del significado nos encontramos con animales con sistemas nervioso central que han tenido las bases en el sentido de la “percepción categórica” en la forma más compleja de habilidades semióticas. La creciente indeterminación - o, libertad semiótica - se puede expresar como la emergencia de tipos de signos cada vez más amplias de su base, en particular, signos señalados. Animales superiores, no sólo puede reconocer señales como inmediatez de tipos, que pueden hacer uso de estos tipos para simbolizar, razonar, argumentar, usar diagramas. Probablemente, el privilegio especial en humanos es la abstracción, lo que lo hace posible para nosotros a hacer explícito y contemplar esos tipos, razonamientos, diagramas con cualquier modo colocado entre corchetes y, por tanto, facilitar el control, la experimentación, y el rápido desarrollo de estos signos.
  19. La biosemiótica, por lo tanto, supone una distinción entre la cuestión de los signos o señales y la cuestión de la conciencia. El procesamiento de señales son llevados, a ser posible, sin la conciencia, y como la existencia de signos pueden ser inferido desde la conducta externa de un proceso, el establecimiento de un qualia de conciencia en un sistema puede tener cualquier metodología. Parece ser una tendencia, sin embargo, que los procesos complejos de significación están cada vez más facilitados por la conciencia, tal vez como un tipo especial de andamiaje neuronal.
  20. La interrelación de la red biosemiótica de conceptos utilizados aquí – membrana, signo, sitio activo, función, metabolismo, organismo, Umwelt, nichos, etc. – constituye una ontología regional (Husserl) de biología y semiótica, y de toda la biología, incluso la mayoría de las posibles interpretaciones reduccionistas<sup>80</sup>.
  21. Biosemiótica no implica vitalismo, ya que no supone la existencia de un “élan vital”, fuerza desconocida orgánica o campos similares. Tampoco implica ningún tipo de relativismo o subjetivismo, aunque si cada organismo sencillo y cada especie tiene su propio punto de vista, este escepticismo no implica que los puntos de vista pueden compararse y evaluarse. Por el contrario, la biosemiótica implica un *idealismo* en un cierto sentido de la palabra – que no se refiere a un mundo creado por un sujeto o nada por el estilo, sino que se refiere a la realidad de los objetos ideales (así como las redes conceptuales). Un tipo especial de objeto ideal merece mencionarse aquí, con unas posibilidades. Posibilidades que supone que debe tener existencia real, incluida la idea de una afectación espacio físico de todos los posibles genomas, la idea de la virtualidad en la naturaleza, la idea de las tendencias en el desarrollo y evolución, y, correlativamente, la posibilidad de acoger las causas finales para preferir una tendencia respecto a otra. Por lo tanto, la biosemiótica

---

<sup>80</sup> Esto va en contra del argumento de Morten Tønnessen (2001) que afirma que los conceptos universales de la biología es imposible, porque podríamos imaginar formas de vida completamente diferente de las que conocemos. La generalización aquí puede caer en una falacia donde las condiciones no deban de cumplir con los requisitos conceptuales expuestos. En el caso de conocer una forma contrapuntística de vida diferente a la organizada a través del carbono podría ofrecer (o no) una negación a este argumento.

supone una revolución ontológica al admitir el papel indispensable de la idealidad en el sentido estricto en las ciencias.

22. Para cerrar el círculo biosemiótico: Las posibilidades reales también son los que hacen posibles las señales o signos: cualquier signo o señal suficientemente complicada hace referencia a un conjunto de objetos reales meramente posibles integrados más adelante en un círculo funcional, es decir, a una condición de posibilidad, a veces factible, otras veces no.

Ahora bien, las tesis sobre la biosemiótica han sido desarrolladas en 2009 por el propio Frederik Stjernfelt junto con Jesper Hoffmeyer, Claus Emmeche, Terrence Deacon y Kaveli Kull. Se tratan de ocho tesis que tienen como objetivo amplificar las ideas expuestas en el *Tractatus Hoffmeyerensis* introduciendo todas las variadas formas de comunicación y de significación – sea a nivel celular, el comportamiento adaptativo, la comunicación animal y el intelecto humano – y a su vez introduce conceptos como la zona umbral de la semiótica y analiza los conceptos de la semiosis, función, Umwelt, así como conceptos básicos para la biología teórica. Las ocho tesis son las siguientes:

1. *La distinción semiótico – no-semiótico es coextensiva con la distinción vida – no-vida, es decir, con el dominio del general la biología.*

Los conceptos de función y la semiosis (los procesos de los signos o señales) se entrelazan, aunque no es del todo claro que compartan una tautología coextensiva<sup>81</sup>. Ambos son conceptos teleológicos en el sentido de estar determinados con respecto a una finalidad (o la consecución de un ciclo, etc.) – de una correlación específica aún ausente. Los procesos teleológicos que están especialmente organizados con respecto a los fines específicos o referentes son exclusivos de los procesos vivos.

Si pensamos en una *función* como un *proceso organizado* en torno a un fin implícito representado, a continuación, estas dos clases de fenómenos deben ser consideradas enteramente coextensivos. Por otra parte, la semiosis, la actividad de los procesos de señales, puede ser considerada sólo en condiciones en las que exista explícita o implícitamente una representación de un estado final o en las que una condición de satisfacción funcional puede ser identificada como la sostenible o no sostenible, en cuyo caso la semiosis puede ser definida con respecto a la función anterior.

2. *La biología está incompleta como ciencia en la ausencia de un conocimiento semiótico explícito.*

La razón de por qué esto no se percibe como un problema es que la biología compensa la semiosis excluida mediante la introducción de una plétora de términos semióticos implícitamente como “información”, “adaptación”, “signo”, “señal de entrada”, “código”, “mensajero”, “fidelidad” y “cruce de voces”. Estos usos están bien definidos

---

<sup>81</sup> Por ejemplo hay procesos físicos irreversibles que son prebióticos y que infieren algún procesamiento de información de contenido semiótico, como podría darse en micelas y tensoactivos y que afectan también en la tautología entre autopoiesis y vida.

y rara vez se aplican a menudo de manera metafórica al parecer, con la suposición implícita de que pueden reducirse a meros acontecimientos químicos si es necesario.

3. *El poder predictivo de la biología está incorporado en el aspecto funcional y no puede basarse únicamente en la química.*

Es una verdad aceptada en la biología que la estructura y función son interdependientes; por ejemplo, una explicación biológica es incompleta incluso si la producción y la estructura de una macromolécula en una célula se han descrito de forma exhaustiva.

¿Para qué sirve esta fundamental explicación? Kaveli Kull comenta que responder a esta pregunta es parte de la contextualización funcional que requieren todas las actividades biológicas. En muchos casos, estas funciones se caracterizan por tener un carácter regulador, de portador de información, o de tipos de señalización, y por lo tanto describiendo la función de estas estructuras están realmente enmarcados en un sistema más amplio que tiene una característica de procesamiento de signos (por ejemplo, la transducción de señales). En este sistema más amplio, las funciones que una macromolécula toma parte (o contribuye en algo) puede cumplirse por otras estructuras diferentes, y por lo tanto, la estructura se ve como un vehículo para cumplir esa función. La localización y la clarificación de las partes funcionales – procesuales en una red más amplia en el metabolismo permiten predicciones parciales de algunas limitaciones que deben cumplirse para que el vehículo de una función sea capaz de trabajar. La mayor parte de la capacidad predictiva de la biología se pierde si se excluye el análisis *semio-funcional*.

4. *Las diferencias en la metodología distinguen una biología semiótica de la no-semiótica.*

Es el objetivo de biosemiótica explicitar los supuestos que se importan en la biología por tales conceptos teleológicos no analizados como “función”, “información”, “código” “signo” y “señal” y para proporcionar una base teórica para estos conceptos. El uso generalizado de dichos términos en la actual biología da por hecho de que tales ideas no se pueden evitar o sustituir totalmente con los meros acontecimientos químicos. La biosemiótica tiene la tarea científica de (1) recoger tales términos en un contexto físico-biológico; (2) definir interrelacionar dichos términos con el objetivo constante de evitar los antropomorfismos que pongan en peligro cuando se quedan sólo con las definiciones implícitas, y (3) procurar una biología teóricamentemás completa.

Es importante subrayar que en la toma de estas definiciones de la teleología, la biosemiótica establece coherente la teleología interna ya descrita por Kant (como hemos tratado anteriormente) y su crítica a una metafísica ingenua, donde la idea de un *telos* es tratada como algo externa a la naturaleza, que por medio de poderes extraños, desconocidos afecta a los procesos naturales. Por el contrario, su definición de *telos* es funcional y por lo tanto de naturaleza interna, caracterizando así a una clase específica de los procesos naturales. Se trata de un concepto de *telos* que no se refiere a las fuerzas vitalistas desconocidas sino que define el *telos* de una clase específica de procesos

causales. También es fundamental el encuadre correcto de Uexküll dentro de esta teleología donde se distingue de la entelequia de Driesch. Como bien dijo Ernst Cassirer: “Mientras que Driesch en su concepción de la entelequia quería demostrar una autonomía específica de la función, Uexküll partió de la autonomía de la forma”<sup>82</sup>. La complementariedad entre las caracterizaciones fisicoquímicas de la vida y la teleología no se destruirá si no se reduce la semántica a una parametrización antropomórfica.

5. *La función está intrínsecamente relacionada con la organización, la significación y el concepto de agente autónomo o “self”.*

De hecho la función no es tan sólo un reflejo de la historia evolutiva. La funcionalidad es el requisito previo para la evolución de los organismos. La evolución presupone funciones y vice-versa. La selección natural no puede ser definida si no es respecto a enlaces, auto-mantenimiento, y auto-reproducción de sistemas unitarios dinámicos. La posibilidad de evolución deriva del hecho que las funciones, por la multiplicidad de veces de sus realizaciones, pueden cooptar en cualquier incidencia fisicoquímica de las propiedades de los substratos que utilicen. De esta forma, la semiosis puede cooptar en cualquier acontecimiento o incidencia manifestada en los procesos funcionales o sus propiedades.

Hay que tener en cuenta que no está aún resuelto el planteo de la relación entre la semiosis y la función, cuyos paradigmas terminológicos pueden caracterizar mejor sus relaciones fundamentales. Por lo que el acoplamiento de las señales de percepción y signos de acción en el ciclo funcional de Uexküll tienen una inferencia estructural del modo “si – entonces”<sup>83</sup>. Kull comenta que las señales de percepción forman la premisa de la conclusión inherente a los signos de acción consiguientes y reconoce que alguna cosa está inherente, por lo que el organismo “toma una decisión” para actuar sobre las bases de esta información. Este ciclo o circuito funcional tiene una estructura “si – entonces” como habíamos dicho, ya sea de tipo inductivo, deductivo o abductivo. Sin embargo, la definición de procesos funcionales y procesos semióticos, en relación con el concepto de inferencia, corre el riesgo de ser acusado de circularidad. Para evitar confusiones, es preferible otros términos, como por ejemplo la casualidad condicional y proto-argumento.

Charles Saunders Peirce identificó la lógica con la semiótica en el sentido más amplio<sup>84</sup>. La clase signo denominado “*cualisigno*” (como podría ser la sensación de ácido o de calor), a parte de ser una cualidad icónica i sensitiva, puede interpretarse como un signo

---

<sup>82</sup> Cassirer, Ernst (1950) *The Problem of Knowledge: Philosophy, Science, and History since Hegel*. New Haven: Yale University Press. p. 200.

<sup>83</sup> Esto podría alinearlos con la noción de Peirce de un argumento. “Argumento” aquí no se debe tomar en el sentido de la lógica simbólica, donde toda la estructura interna de la misma tiene que estar explícita, sino más bien en un sentido peirceano más amplio como signos cuyos *interpretantes* - en este caso los signos de acción- están realizadas de una forma explícita.

<sup>84</sup> Peirce, C. S. (1931-1958) *Collected Papers of Charles Sanders Peirce*, vols. 1-8, C. Hartshorne, P. Weiss y A. W. Burks (eds). Cambridge, MA: Harvard University Press. En castellano: *Obra Lógico-Semiótica*. Edición de Armando Sercovich. Trad. Alcalde, R., Prelooker, M. Ed. Taurus (1987). 2254. pp. 244 y ss.

de esencia – *tema-remá*<sup>85</sup>. Por lo tanto considero el “cualisigno” peirceano como un equivalente homeomórfico al concepto de qualia, ya que puede interpretarse como una catexia – *saliencia-pregnancia* – en tanto que es una excitación o irritación que infiere a una determinada regulación biológica<sup>86</sup>. La adaptación también implica el reclutamiento selectivo de aquellos aspectos fisicoquímicos del entorno del organismo que son relevantes para la persistencia del proceso. Como consecuencia, las relaciones condicionales de la lógica se volvieron a re-presentar en las formas y los hábitos de los organismos y sus componentes que incorporan esta lógica *bio-lógica*. De esta manera, la semiosis facilita el desarrollo de la capacidad de un organismo a comportarse de una manera que sea compatible con su entorno y además ser implícitamente inferencial. La “lógica”, como estamos usando aquí no es algo que debe ser considerado como un producto de la cognición abstracta en los seres humanos, sino simplemente la intención de resaltar la arquitectura de los organismos como la inferencia de la función biológica, y que nos llevará a ser también la base de la semiosis en general.

#### 6. *La fundamentación de la semiótica general tiene que utilizar herramientas biosemióticas.*

Para Kull, Emmeche, Hoffmeyer, Stjernfelt y Deacon – promotores de estas tesis – el objetivo es comprender la dinámica de los mecanismos orgánicos para el surgimiento de funciones semióticas, de una manera que sea compatible con los hallazgos de la biología contemporánea y, por lo tanto también se observe reflejada la historia evolutiva y del

---

<sup>85</sup> Los conceptos de tema y rema se emplean para describir la estructura del enunciado desde un punto de vista informativo, partiendo del supuesto de que en los enunciados puede distinguirse entre estos dos componentes (también denominados en otras corrientes teóricas tópico y comentario, respectivamente). El tema corresponde a lo que intuitivamente se puede expresar como aquello de lo que se habla; mientras que rema es lo que se dice del tema.

A mediados del siglo XX, los lingüistas de la Escuela de Praga (F. Danes, V. Mathesius, J. Firbas, entre otros) fueron quienes iniciaron las investigaciones sobre la estructura de la información primero en la oración y después en los textos. En la década de los 70, M. Halliday, continuando la perspectiva de la oración propugnada por la Escuela de Praga, emplea el concepto de tema sintáctico para referirse al constituyente situado más a la izquierda en la frase; mientras que rema es todo lo demás que sigue en la oración y que consta de lo que el hablante afirma sobre el punto inicial de la oración.

Teniendo en cuenta esta concepción de tema y rema, no resulta sorprendente la asociación de tema con información conocida (información que el emisor cree que el receptor ya conoce) y rema con información nueva (información que el emisor cree no conocida por el receptor). De todos modos, la Escuela de Praga ya señaló que dicha coincidencia se da con frecuencia, aunque no necesariamente. En cualquier caso, se ha tachado esta dicotomía de equivalencias como demasiado reduccionista, por lo que J. Firbas (1971) deja el campo de oposición más abierto, mencionando la existencia de elementos transitorios entre el tema y el rema, así como temas y remas secundarios. Para referirse a dicha gradación, introduce el concepto de dinamismo comunicativo, considerando estos dos elementos como los polos de un continuo informativo. De este modo, J. Firbas asocia tema con el elemento menos portador de información y rema con el elemento que hace avanzar el texto. *Diccionario del Centro Virtual Cervantes*. [http://cvc.cervantes.es/ensenanza/biblioteca\\_ele/diccio\\_ele/diccionario/tema.htm](http://cvc.cervantes.es/ensenanza/biblioteca_ele/diccio_ele/diccionario/tema.htm)

<sup>86</sup> La extrapolación de la lingüística a la semiótica en biología admite la capacidad de relacionar la adaptación comunicativa entre organismos de la misma especie o de una gradación filogenética abierta. Pero la materia fisicoquímica de las señales de percepción y las de acción ofrece una relación directa entre saliencias y pregnancias (según la terminología de René Thom) en tanto que las saliencias son formas individualizadas en un espacio (euclidiano o no). Las pregnancias son acciones propagativas emitidas por las formas salientes a las que las que las pregnancias catectizan, y esa catexia provocan en el estado de tales formas transformaciones llamadas efectos figurativos.

Thom, R. (1990) *Esbozos de una semiología física*. Ed. Gedisa. Barcelona. p. 57.

desarrollo de las funciones de signo. También son conscientes que la biosemiótica no da por sentado la gran variedad de conceptos de señales, signos de acción y demás, en las diferentes tradiciones semióticas, pero se observa esto como un recurso no dogmático para la construcción de un flujo de actualizaciones (up-to-date) cada vez más refinado y mejor fundamentado en lo que concierne a la biología contemporánea.

¿Qué hacen en realidad los signos? Estabilizan o, mejor dicho aseguran modos fiables de auto-mantenimiento de tal manera que son capaces de expandir el ámbito de los procesos que ya han demostrado ser funcionales en el pasado<sup>87</sup>. Lo hacen de una manera económica, permitiendo el reconocimiento de no más de un aspecto de un objeto a ser suficiente para el organismo para actuar sobre dicho objeto. Por supuesto, la otra cara de esta economía es la posibilidad de la falibilidad, pero la falibilidad es también lo que ofrece el espacio de alternativas que hacen posible la evolución. Este aseguramiento de las formas anteriores y las relaciones dinámicas implica “recordar” lo que ya ha demostrado ser funcional para el auto-mantenimiento. Recordando una bio-forma es como recordar su receta para su modo de producción, o la regeneración<sup>88</sup>. Para recordar en este punto de vista biológico es el de poder poner en uso (para algunos sistemas de signos) el conjunto de restricciones o la imposición de condiciones de contorno que los procesos físicos y químicos confinan para concretizar los medios de producción de estas mismas formas<sup>89</sup>.

7. *La semiosis es un concepto central para la biología – Sin embargo, se requiere una definición más exacta.*

Aunque hay muchas descripciones de los procesos semióticos, es todavía un desafío no resuelto proveer de una exposición que explique lo que constituye exactamente la semiosis sin tener que asumir un intérprete homuncular – es decir autoreferente –, o bien dejando relaciones críticas no definidas. Si bien esto no es tan problemático para la semiosis en la comunicación animal, humana o compleja, donde un intérprete puede ser asumido provisionalmente sin más explicación, se convierte en un serio desafío para las cuestiones fundamentales en biosemiótica, ya que no podemos en estos casos recurrir a un intérprete extrínseco. El organismo (o el organismo más su medio ambiente) debe, en sí mismo, constituir un intérprete, pero en el análisis biosemiótico debemos tratar de ser explícitos al explicar específicamente qué procesos proporcionan las condiciones necesarias y suficientes para considerar un proceso semiótico.

---

<sup>87</sup> Hoffmeyer introdujo el término *andamiaje semiótico* a fin de caracterizar el papel de los procesos de un signo: cada paso en la ontogenia es temporalmente apoyado por una red de procesos internos de signos que aseguran la dirección correcta del proceso. Un similar apoyo en la estructura de la interacción semiótica (en el plano ecológico) puede jugar un papel en la filogenia.

<sup>88</sup> La forma de un proceso no es su existencia real, sino su participación en una clase general de los procesos, y esta clase recíprocamente puede ser definida con respecto a una consecuencia común funcional alcanzada.

<sup>89</sup> Conferencia de Peirce: “Lo que se comunica desde el Objeto a través de la señal para el Interpretante es una Forma, es decir, no es nada como un existente, pero es un poder, es el hecho de que algo iba a suceder bajo ciertas condiciones” (Peirce, MS 793: 1-3., cf EP2, 544, n 22).

La capacidad interpretativa es una propiedad emergente de una recíprocarrelación *fin-significado* mediante de un sistema dinámico de auto-propagación. La falta constitutiva es la base tanto de la función biológica como de la dependencia de un entorno. Debido a que un organismo debe rehacerse incesantemente, la utilización de recursos que ofrece su entorno debe estar en correspondencia dinámica con estas características cruciales intrínsecamente ausentes, y en el mismo tiempo, sus componentes y la dinámica debe ser recíprocamente generadoraentre sí con respecto a esta ausencia. A este respecto, un organismo es un proceso de interpretar señales que puede ser descrito como una auto-referencia recursiva de procesos de producción de señales y/o signos, en función de o influenciados por algunos factores externos que puedan estar presentes en su entorno.

Actualmente la biosemiótica no está en condiciones de proporcionar una mayor precisión y de una descripción inequívoca de la arquitectura interpretativa en la que está implícito un organismo. Sin embargo, se pueden identificar muchos procesos críticos de componentes y las relaciones que deben participar, pudiendo proporcionar un esbozo de lo que puede implicar el modelo sencillo de la creación de una relación.

Podemos identificar siete propiedades o condiciones que deben ser reunidas. Lo siguiente es un esbozo de estas condiciones críticas:

- a) *Agencialidad (organismo)*: Un sistema unitario con la capacidad de generar comportamientos dirigidos-finales.
- b) *Normatividad*: Un proceso semióticoacrecienta las propiedades normativas, en un sentido amplio, quedando de esta maneraencajado en un proceso que contribuye la normatividad. Esto incluye la posibilidad de que la representación esté en error o que sus consecuencias (en términos de Peirce: su interpretante dinámico) puedan ser compatibles o incompatibles con la preservación la integridad del sistema vivo en el que ocurre.

Para entender esta noción mínima de la normatividad, pensemos en la diferencia entre un patrón físico como tal y patrón que sirve para una función. Cualquier patrón físico específico puede caracterizarse por la teoría algorítmica de la información, ya sea como altamente aleatorio, o altamente regular, o algo complejo entre ambos, ya sea tanto de forma descriptivamente compresible o verdaderamente complejo e incompresible. Pero un patrón que sirve para una función tiene, además de su propio alto o bajo contenido de información algorítmica, un grado al que le es útil o no su resultado o meta. Para los procesos semióticos (con funciones tales como la representación, el almacenamiento de la información, y la interpretación) el grado en que un patrón sirve o no a estas funciones constituye una norma.

- c) *Teleo-funcionalidad*: La semiosis esta siempre integrada en un proceso que se dirige al final u objetivo en el que la semiosis puede evaluarse en relación con que si su interpretación es concordante o discordante con la dinámica de la consecución de ese fin. Esto es lo que determina las propiedades normativas de un proceso de interpretación de señales y/o signos.
- d) *La generación de la forma*: La organización sistémica, que es responsable de la interpretación de la función semiótica de un vehículo de signo (u objeto

peirceano), debe incluir un proceso de generación de forma que directa o indirectamente contribuye a la persistencia (re-presentación) de esa función. El proceso de interpretación está constituido por la generación de una estructura (forma física) que actúa como una señal de la señal previa y que a su vez puede producir mayores consecuencias estructurales.

La diferenciación de un vehículo signo de la dinámica del proceso recíproco de forma – generación: Un vehículo signo debe estar aislado de la dinámica que restringe y que es responsable de generar una repetición de este proceso.

e) *Categorización*: La repetición de signos nunca puede ser 100 por ciento idénticos físicamente. Esto, junto con la normatividad, la razón por lo que los signos forman tipos. La categorización aparece en todos los procesos de comunicación en caso de sistemas suficientemente adaptativos. Funcionalmente casos similares de signos se subsumen en un tipo general. Al mismo tiempo, aquello que se refieren los signos también se categoriza. Esto lo veremos pronto con la categorización de la percepción de Frederik Stjernfelt. Este aspecto del uso del signo es altamente económico, ya que permite al organismo a pasar con la generación de sólo un número finito de modos sencillos, típicos de acción interpretativa para alcanzar fines similares. La otra cara de esto es, por supuesto, la posibilidad de falacia.

f) *La herencia de las relaciones*: Varios procesos de desarrollo incluyendo aquellos que han creado nuevas relaciones de correspondencia entre las partes del organismo y entre el organismo y su entorno, y se supone que son los medios principales por los cuales las relaciones semióticas se generan. A este respecto, la herencia genética representa una de las formas más básicas de la semiosis, y el estudio de las condiciones de su generación debe dar una idea de la proceso formativo semiótico basándose en procesos físicos. Además de herencia genética, hay varias otras formas de herencia (por ejemplo, epigenética, neuronal, social, etc.) que están en uso por varios procesos de comunicación. En este sentido, los procesos semióticos incluyen procesos de memoria en general que mantienen la continuidad de la información y la estabilidad de opciones dinámicas.

Por lo tanto, la referencialidad puede existir sin la invocación mental (*sensu stricto*) operaciones (procesos que tienen lugar en el cerebro, posiblemente con la participación, por ejemplo, del conocimiento, de la conciencia). Por el contrario las operaciones, mentales en este sentido pueden evolucionar como un aumento de orden superior de las capacidades para generar y procesar referencialidad.

## 8. *Los organismos crean sus Umwelten*

Los organismos, como la encarnación de semiosis, no son separables del medio ambiente sin perder su naturaleza esencial. Por lo tanto, son esenciales una serie de conceptos específicos que describen estas relaciones.

El Umwelt – como hemos visto anteriormente – es el conjunto de características del medio ambiente distinguido por el organismo, o el mundo centrado en sí mismo en el que se relaciona un organismo con todo lo demás. Lo hemos denominado “*campo de percepción multisensorial del entorno*”.

Un nicho semiótico se define como la totalidad de los signos o señales en el entorno de un organismo; signos que deben ser capaces de manera significativa interpretar para asegurar su equilibrio y bienestar. El nicho semiótico incluye los factores tradicionales de nicho ecológico, pero ahora también se destaca la dimensión semiótica de estos factores. El organismo debe distinguir de forma relevante desde los alimentos hasta las amenazas irrelevantes, por ejemplo, y éste debe identificar los marcadores necesarios de los recursos bióticos y abióticos que necesita: agua, vivienda, construcción de nidos, los materiales, compañeros de apareamiento, etc. El nicho semiótico por tanto, incluye todos los retos interpretativos que los nichos ecológicos fuerzan sobre la especie.

El nicho semiótico de esta manera puede ser visto como una contraparte externalista del concepto de Umwelt: si el Umwelt denota un modelo interno en el organismo, entonces el nicho semiótico se refiere a un segmento externo del entorno. Esto hace que el concepto de Umwelt sea compatible con un enfoque evolutivo, ya que ahora se puede plantear la cuestión de si el Umwelt de una especie está suficientemente diferenciado para afrontar los retos que plantea la disposición semiótica de las condiciones del nicho.

### **La biosemiótica como transdisciplina: prolegómenos para una biohermenéutica.**

En la interrelación entre las múltiples disciplinas científicas que se interesan en el desarrollo epistemológico de la biosemiótica se está comprendiendo que, para que la conectividad entre dichas disciplinas provoque una emergencia de significado compacto y coherente respecto a una mejora de la comunicación científica de la comunicación biológica<sup>90</sup>, es urgente trascender la interdisciplinariedad. Pues no tiene sentido mantenerse en el nivel de intercambio de materias disciplinarias únicamente en cuanto a la relación de patrones de modelos científicos usufructuables (en sus límites tanto semióticos como disciplinarios). Es necesario establecer una plasticidad cognoscitiva (Nicolescu 2008) para obtener niveles holísticos de desarrollo científico y de integración de contenidos de estudio que permita una hermenéutica biológica significativa.

### **La Transdisciplinariedad**

La palabra “transdisciplinar” fue acuñada hace cuarenta años por Jean Piaget. El mismo Piaget, durante el Congreso Internacional “Interdisciplinariedad - Problemas de enseñanza e investigación en universidades” de 1970, anunciaba que (palabras textuales) “finalmente, deseamos superar las relaciones interdisciplinares a un estadio superior, que podría ser la *transdisciplinariedad*, en la cual, el conocimiento no se limita a reconocer las interacciones o reciprocidades entre las investigaciones

---

<sup>90</sup> Esta “metacomunicación” científica es el desarrollo epistemológico que Gregory Bateson denomina “jerarquía de prototipos lógicos” que será también un criterio del proceso mental, y por tanto un asunto fenomenológico de la biología (Bateson 1979; Capra 1996).

especializadas, estableciendo esas conexiones dentro de un sistema total sin límites estables entre las disciplinas”<sup>91</sup>.

Aunque dicha definición es vaga, no le quita el mérito de hacer espacio a una nueva forma de conocer y de investigar. Conocimiento que contribuye a un replanteamiento metodológico, epistemológico, gnoseológico y sobretodo educativo. Es una nueva percepción del conocimiento humano, de la dinámica estructural de nuestro cognitismo y, a su vez de establecer nuevas conexiones disciplinarias en continuo dinamismo, sin fronteras estables o rígidas.

Ahora bien, el prefijo “trans” puede atraer la trampa de una explicación hipercientífica, una especie de “ciencia de las ciencias” donde cabe la explicación unificada de todo a través de sus partes. Tampoco tiene un sentido “meta-disciplinario”, es decir, ir más allá del desarrollo que las disciplinas científicas y humanísticas pueden concentrar en sus investigaciones con rigor y coherencia. “La totalidad no es la verdad” afirma Theodor Adorno<sup>92</sup>, y que Edgar Morin cita en el prefacio de su libro “Ciencia con Conciencia”. Por eso complejidad – argumenta Morin – lleva en sí la imposibilidad de la unificación, la incertidumbre, la complementariedad, la indecidibilidad, incluso al final el encuentro cara a cara con lo indecible. Se trata que, aceptando la heterogeneidad de los campos de estudio, y el despliegue del espectro de presencia fenoménica en dichos campos, se respete susodichas naturalezas (tanto de estudio como del objeto de estudio) para comprender la coherencia significativa que permite la interacción sujeto-objeto en el desarrollo “a través” y “entre” las investigaciones.

Para alcanzar esa coherencia significativa se pretende estudiar el problema de la polisemia terminológica y conceptual de los objetos de conocimiento, ofreciendo un *engarce* de sus *contenidos significativos*. Es decir, multiplicar la capacidad semántica, dimensionándose en función de su riqueza disciplinar, de sus giros gnoseológicos, lingüísticos y hermenéuticos, y de sus capacidades metodológicas.

En el caso de la investigación transdisciplinar, aprender desde la experiencia requiere de un especial esfuerzo debido a la heterogeneidad de los campos de los participantes. Actualmente existe una falta de un fortalecimiento estructural de las instituciones para la investigación transdisciplinar que es necesario establecer en comunidades científicas que puedan desarrollar proyectos de trascendencia científico-humanista para la fundamentación del conocimiento de la complejidad en todos los ámbitos del saber humano. Esto es lo que en palabras de Edgar Morin se denomina una necesidad de “fundamentar el conocimiento del conocimiento”.

---

<sup>91</sup> Piaget, J (1970) “*L’épistémologie des relations interdisciplinaires*”. Lectura ofrecida en el congreso “L’interdisciplinarité – Problèmes d’enseignement et de recherche dans les universités” en las conversaciones de Jean Piaget, Erich Jantsch y André Lichnerowicz, organizada por la Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), en colaboración del Ministro de Educación Nacional de Francia y la Universidad de Niza. En Léo Apostel et al. (1972) *L’interdisciplinarité – Problèmes d’enseignement et de recherche dans les universités*, Paris, OECD, CERI. p. 144.

<sup>92</sup> Theodor Adorno (1987) *Minima moralia*, Alfaguara, Madrid, § 29, p. 48. La frase, traducida por Joaquín Chamorro dice concretamente “El todo no es la verdad”.

Dice Morin (1986):

“El conocimiento es sin duda un fenómeno multidimensional en el sentido que, de manera inseparable, a la vez es físico, biológico, cerebral, mental, psicológico, cultural y social.

Este fenómeno multidimensional es roto por la misma organización de nuestro conocimiento, en el seno de nuestra cultura; los saberes que, unidos permitirán el conocimiento del conocimiento, se hayan separados y parcelados”<sup>93</sup>.

Es decir, que comprendiendo que todo evento cognitivo necesita de una conjunción compleja de procesos que van desde la propia energía neurobiológica del cerebro de uno, hasta la los procesos sociales, interpersonales e incluso, transpersonales e impersonales, el conocimiento en la actualidad está desarrollando competencias interdisciplinarias que permitan estas conexiones.

Describiré escuetamente las diferencias que existen entre la pluridisciplinariedad, la multidisciplinariedad, la interdisciplinariedad y la transdisciplinariedad.

La *multidisciplinariedad* es la capacidad de trabajar con varias disciplinas que pueden estar más o menos contiguas mezclándolas sin integrarlas en la que cada disciplina conserva sus métodos y suposiciones sin cambio o desarrollo de otras disciplinas en su relación.

La *pluridisciplinariedad* consiste en el estudio del objeto de una sola y misma disciplina por medio de varias disciplinas a la vez. Es la unión no-integrativa de dos o más disciplinas, más o menos cercanas y por lo general dentro de un campo de conocimientos, que conservan sus métodos y modelos propios, como ocurre en la multidisciplinariedad pero en la que se busca mejorar la relación entre ellas.

La *interdisciplinariedad* tiene una mirada diferente. Conciene a la transferencia de métodos de una disciplina a otra. Se pueden distinguir tres grados de interdisciplinariedad:

- a) un grado de aplicación. Por ejemplo, los métodos de la física nuclear transferidos a la medicina conducen a la aparición de nuevos tratamientos del cáncer.
- b) un grado epistemológico. Por ejemplo, la transferencia de los métodos de la lógica formal en el campo del derecho genera análisis interesantes en la epistemología del derecho.
- c) un grado de concepción de nuevas disciplinas. Por ejemplo, la transferencia de los métodos de la matemática en el campo de la física ha engendrado la físico-matemática, de la física de las partículas a la astrofísica -la cosmología cuántica, de la matemática a

---

<sup>93</sup> Morin, E. (1986) *La Methode. III. La connaissance de la connaissance*. Éditions de Seuil. En castellano: *El Método III. El conocimiento del conocimiento*. Ediciones Cátedra (1999). p. 20.

los fenómenos meteorológicos o los de la bolsa -la teoría del caos, de la informática en el arte- el arte informático.

Como la pluridisciplinariedad, la interdisciplinariedad sobrepasa las disciplinas pero su finalidad queda inscrita en la investigación disciplinaria.

Según palabras de Basarab Nicolescu(2008)<sup>94</sup>:

*Multidisciplinariedad* se ocupa de estudiar un tema de investigación no sólo en una única disciplina, sino en varias al mismo tiempo. Cualquier tema que se trata en última instancia, se verá enriquecido por la incorporación de la perspectiva de varias disciplinas. La Multidisciplinariedad aporta un "plus" a la disciplina en cuestión, pero este "plus" está siempre en el servicio exclusivo de esa misma disciplina. En otras palabras, la gestión pluridisciplinaria sobrepasa las disciplinas pero su finalidad queda inscrita en el marco de la investigación disciplinaria.

*La interdisciplinariedad* tiene un objetivo diferente a la multidisciplinariedad. Se refiere a la transferencia de métodos de una disciplina a otra. Al igual que la multidisciplinariedad, la interdisciplinariedad sobrepasa las disciplinas, pero su objetivo sigue siendo en el marco de la investigación disciplinaria. La interdisciplinariedad tiene incluso la capacidad de generar nuevas disciplinas, como la cosmología cuántica y la teoría del caos.

*Transdisciplinariedad* se refiere a lo que es a la vez *entre* las disciplinas, *a través de* las diferentes disciplinas, y *más allá de* toda la disciplina. Su objetivo es la comprensión del mundo actual, de los cuales uno de los imperativos es la unidad del conocimiento.

Los tres pilares de la transdisciplinariedad según el concepto de Basarab Nicolescu son también denominados los *tres axiomas de la metodología* de la transdisciplinariedad:

- Los niveles de Realidad o “el Axioma Ontológico”: *Hay diferentes niveles de la realidad del objeto y, en consecuencia, diferentes niveles de realidad del sujeto.*
- La lógica del tercio incluido o “el Axioma Lógico”: *El pasaje de un nivel de realidad a otra es asegurada por la lógica del tercero incluido.* En él se distingue tanto un principio de conciliación que es la unión de las partes o extremos contrarias en una lógica dialéctica de síntesis, como un principio de complementariedad (existente tanto en mecánica cuántica como en biología).
- La complejidad o “el Axioma Epistemológico”: *La estructura de la totalidad de los niveles de la realidad es una estructura compleja: cada nivel es lo que se debe a todos los niveles existen al mismo tiempo.* En él podemos detectar tanto la

---

<sup>94</sup> Nicolescu, B. (2008) *The Idea of Levels of Reality and its Relevance for Non-Reduction and Personhood*. Conference of Metanexus Institute: Subject, Self, and Soul: Transdisciplinary Approaches to Personhood. Universidad Pontificia de Comillas, Madrid.  
<http://www.metanexus.net/archive/conference2008/articles/Default-id=10502.aspx.html>

emergencia de un sistema complejo como también la condición de posibilidad de una superveniencia entre niveles de realidad.

En cuanto a principio de formas integradoras de investigación, la transdisciplinariedad comprende una familia de métodos para relacionar el conocimiento científico, la experiencia extra-científica y la práctica de la resolución de problemas. En esta comprensión *la investigación transdisciplinar se orienta hacia los aspectos del mundo real, más que a aquellos que tienen origen y relevancia sólo en el debate científico*. Una cuestión de mayor importancia en la investigación transdisciplinar es *hasta qué punto se consigue la integración de las distintas perspectivas científicas*.

### **La investigación transdisciplinar según Jürgen Mittelstrass**

En palabras de Mittelstrass, la transdisciplinariedad es, ante todo, una forma integrada de investigación, más que un concepto integral u holístico, contrariamente a lo que piensa B. Nicolescu. En primer lugar, según Mittelstrass, permite resolver el aislamiento disciplinar en un plano superior metodológico, pero no trata de construir una interpretación "unificada" o mejor dicho, una matriz explicativa. En segundo lugar, la transdisciplinariedad *pretende eliminar puntos muertos en el núcleo histórico constitutivo de los campos y las disciplinas, en donde y cuando éstas se presentaron olvidándose de su memoria histórica de forma intencionada, o que han perdido su poder de resolución de problemas debido a la especulación excesiva*<sup>95</sup>. Por tan sólo estas razones, la transdisciplinariedad no puede sustituir a los campos y disciplinas. En tercer lugar, la transdisciplinariedad es un principio del trabajo científico y la organización que se extiende más allá de los campos individuales y soluciones de disciplinas, pero no es un principio trans-científico. Y por último, la transdisciplinariedad es ante todo un principio de investigación, cuando se considere adecuada en el contexto que he mencionado sobre las formas de la investigación y la representación en las ciencias, y sólo en segundo lugar, en todo caso, un principio teórico, en el caso de que las teorías sigan también las formas de investigación transdisciplinaria.

“El sistema científico tiene que cambiar cuando las investigaciones cambian”<sup>96</sup>.

### **Propuesta abierta: El diálogo dialogal transdisciplinar**

Con la palabra transdisciplinariedad introducimos una cosmovisión metodológica que permite dirigir la atención “a través” y “sobre” las interconexiones de los conocimientos de la humanidad, i. e. de una interdisciplinariedad. El propósito de la misma es ofrecer una “super-visión” heurística, integradora y contingentemente holística de la síntesis del conocimiento de la complejidad de lo existente y de lo pensable, pero no sin haber caminado antes por el hilo de Ariadna de la urdimbre de las especialidades de cada

---

<sup>95</sup> Mittelstrass, J. (2001) *On Transdisciplinarity*. In *Science and the Future of Mankind: Science for Man and Man for Science*. Pontificiae Academiae Scientiarum Scripta Varia. Nº 99. The Pontifical Academy of Sciences. pp. 495-500.

<sup>96</sup> Mittelstrass, J. (2001) Op. Cit. p. 500.

conocimiento que lo integra. La transdisciplinariedad no busca la completitud significativa (Gödel), pero sí obtener una coherencia de conjunto y una consistencia de dimensiones (complementarias) de la realidad que se interconectan entre sí en su desarrollo complejo. Tampoco busca la substitución de la especialidad, porque es necesaria para la especificación del conocimiento, pero no es suficiente.

Por eso uno de los principios que integran la transdisciplinariedad es la complementariedad respecto a la explicación fragmentaria del conocimiento, al igual que el principio de interdependencia del conocimiento disciplinar, y el principio de interpenetrabilidad entre disciplinas (explicar la variabilidad de la densidad de la complejidad y evitar el abuso del principio de parsimonia). Comprender esto permite alcanzar un “consenso semántico” cuando en la transdisciplinariedad se trabaja en clave explicativa a través del diálogo *dialogal* (que no dialéctico) interdisciplinar. Es decir, ante un respeto entre los puntos de referencia de cada disciplina – desde una perspectiva de la sociología de la ciencia y del rigor metodológico – el diálogo es un fundamento indispensable en la investigación tanto interdisciplinar (a nivel de desarrollo de investigación) como transdisciplinar (en el desarrollo explicativo).

Adopto el concepto de *dialogal* acuñado por Raimon Panikkar (1975, 1979, 1995; Boada 2004)<sup>97</sup> en tanto que hace referencia a “establecer un campo común en el cual la discusión devenga significativa”. Es tan “inter-científica” como intercultural. Como “inter-científico” denomino a todo campo de actividad investigadora interdisciplinar que reúne los requisitos epistemológicos adecuados para cada disciplina científica inmersa, y que permite interrelacionarse tanto en las metodologías como las teorías de conocimiento para mayor enriquecimiento en los procesos interpretativos de las disciplinas dadas. Como bien dice Panikkar “la realidad es relacionante”, la interrelación en el diálogo *dialogal* es fundamental para un desarrollo transdisciplinar de la explicación científica.

Al igual que permite también el rigor metodológico adecuado amplificar sin distorsionar la capacidad de investigación en pro de esa consensualización semántica unida, en la pluralidad óntico-ontológica de la complejidad de la multidimensionalidad de aquello que estudiamos como “realidad objetiva”. Una realidad que aunque sea determinada en un entorno de investigación acotado en su objetivo, subyacentrelazamientos, cotas o niveles de observación y con ello mejoras en la determinación interpretativa o en la

---

<sup>97</sup> Como he explicado anteriormente, la obra de Raimon Panikkar tiene la polivalencia interdisciplinar que emana su discurso intercultural. Aunque el centro de su discurso no es la ciencia, sino la religión – y en su caso más panikkariano el diálogo interreligioso – la superación del encasillamiento disciplinar de su enseñanza reside en la propia semántica hermenéutica, la cual se nutre de la propia autoreferencia aplicativa en el caso de un “equivalente homeomórfico” (un caso estrictamente algebraico del *mutatis mutandis*), o de la “hermenéutica diatópica” que es usufructuable en su “diálogo *dialogal*” interdisciplinar en el que *la alteridad* es el que da sentido a la fenomenología de la “*epojé*” – o la suspensión de juicio – que ha de ejercer el oyente partícipe. Dicha actitud metodológica es extrapolable al diálogo entre ciencias de diferentes “disciplinas origen” (inter-científico), o entre ciencias del mismo origen disciplinar (intra-científico). La propia naturaleza diatópica de la hermenéutica de Panikkar permite “salvar las distancias” (dia-topos) entre el aplicativo humanista/religioso – del que él hizo gala – del científico/epistemológico que presento y defiende en este desarrollo.

apertura significativa que, aunque incompleta, siempre sea lo suficientemente robusta y consistente.

### **Equivalente Homeomórfico y Hermenéutica Diatópica**

Para llegar a profundizar mejor sobre los significados he desarrollado un estudio comparativo llamado “equivalente homeomórfico” y una teoría interpretativa llamada “hermenéutica diatópica”.

Las “equivalencias homeomórficas” se dan cuando existen conceptos que, aún teniendo diferencias en cuanto a formas, atributos, o funciones aplicadas en entornos diferenciados, toman ciertas semejanzas semánticas o equivalencias, de tipo funcional o morfológico, que conllevan a un enlace significativo entre sí. Que sean equivalentes conlleva que sean también homólogas. Como decía Panikkar: “Homología no quiere decir que dos ideas sean análogas, es decir, parcialmente iguales y parcialmente diferentes, ya que esto supondría que ambas participarían en un *tertium quid* que proporciona la base para la analogía. Homología significa, más bien, que las nociones comportan papeles equivalentes, que ocupan espacios homólogos, dentro de sus sistemas respectivos. Puede ser que la homología sea una especie de analogía existencial y funcional (...) El homeomorfismo (...) representa una equivalencia funcional descubierta a través de una transformación topológica” Y es una explicación muy acorde a la topología de las catástrofes o teorías de singularidades trabajadas por René Thom y que han sido muy útiles para evidenciar la semiótica intrínseca de Uexküll según confirma Thomas A. Sebeok.

La hermenéutica que permite establecer y reestablecer ligandos homeomórficos en diferentes “*topoi*” Raimón Panikkar lo denominó “*hermenéutica diatópica*”. El conocimiento sobre un concepto que está fuera de mis dominios nos ofrece un reto: Salir de un paradigma (*topos*) para entrar en otro. Diatópica –como hemos dicho– quiere decir que nunca ponemos ambos pies en el “*topos*” del otro, siempre estamos entre los dos, y desde allí interpretamos gestos, creencias, categorías, mensajes. En otras palabras, al interpretar, nos movemos dinámicamente estableciendo vínculos inéditos.

Parafraseando a Pannikar, la “hermenéutica diatópica” es entonces una consideración temática de la comprensión de los demás, sin presuponer que los demás tendrán la misma comprensión básica que nosotros. Es decir, entre científicos y filósofos se debe generar una “hermenéutica diatópica” que hace que no estén ni en un “*topos*” filosófico ni en un “*topos*” científico, sino entre ambos “*topoi*” y “a través” de ambos “*topoi*”, pues es a través de la ciencia y la filosofía que se pretende una “biohermenéutica” y una “biosemiótica” acorde a este proceso abierto, consistente y a la vez incompleto que es el conocimiento filosófico de la ciencia, fruto de ambos conocimientos, también abiertos, consistentes e incompletos.

Esta es, *mutatis mutandis*, la apuesta que hizo Jakob Johann von Uexküll en este arco reflejo y reflexivo conjugado desde los sentidos (*Sinn*) hasta el sentido (*Bedeutung*), y del significado (*Bedeutung*) hasta los signos (*Sinnbild*). De dicha apuesta – y de la que

hablamos más adelante – podemos enriquecer la explicación tanto gnoseológica como epistemológica de un paradigma en biología que quedó ya en su tiempo desprovisto de instrumentación tecnológica y metodológicamente iniciada, pero no falsada de una “*Biología Subjetiva*”. La pregunta de Uexküll por el conocimiento fenomenológico de la biología desde la experiencia del propio organismo con la que inició sus investigaciones en su Institut für Umweltforschung de la Universidad de Hamburgo en 1926 perduraron hasta su jubilación en 1940 y fueron seguidas póstumamente (†1944) hasta el cierre del Institut en 1960.

### **La Biohermeneutica**

La capacidad transdisciplinar permite una mayor transacción y coordinación de criterios científicos de diferentes naturalezas epistemológicas adaptando un contraste profundo, de acuerdo a una contemplación de lo complejo como un todo. Y la biosemiótica establece la condición de posibilidad de comprender la fenomenología biológica como un todo significativo en cada una de sus jerarquías interpretativas de los sistemas vivos, llamado también “biohermenéutica” (Chebanov 1999).

El profesor Sergei V. Chebanov<sup>98</sup> de la Universidad de San Petersburgo ha atribuido una máxima importancia el aspecto interpretativo de las actividades biológicas de los organismos. Ahora, mientras que la hermeneutización de las disciplinas de humanidades están siendo desarrolladas y algunos ámbitos de la biosemiótica parece estar implicados en ella, Chebanov (1999) encuentra suficientes razones para llamar a esta tendencia una “biohermenéutica” lato sensu.

Ya en 1972, el profesor Chebanov en un seminario sobre Biología Teórica en San Petersburgo, el cual fue uno de los fundadores, dejó en clave los objetivos de la biosemiótica eslava:

“El biólogo explícita o implícitamente, se enfrenta a la difícil tarea de representar sus resultados en una forma apropiada para este conocimiento para adaptarse a la cultura, ya que la cultura occidental moderna prácticamente no tiene los medios para tratar a los vivos, sin perder sus propiedades específicas. Esta idea provocó el interés del Seminario en los aspectos de la biología culturoológicos, así como las relaciones entre la actividad del biólogo, su personalidad, y el contexto cultural.

Como fruto del análisis de los medios *bioformales* de representación del conocimiento, se desarrolló toda una concepción de “biocentrismo”, implicando la orientación cultural hacia la Vida (a diferencia de la orientación a la no-vida, como el “fiscalismo”, y al hombre, como el “antropocentrismo”, predominante en la cultura europea).

---

<sup>98</sup> Chebanov, S. V. (1994) Man as participant to natural creation: Enlogue and ideas of hermeneutics in biology. In Rivista di Biologia 87(1), 39–55.

Cuando el fenómeno de la vida se considere de manera más amplia, esto es cuando las formas de vida que no sean biológicas se tengan en cuenta, “la vida” resultará ser la noción básica de una concepción más general: “vital-centrismo”<sup>99</sup>.

El objetivo de la biohermenéutica para Chebanov es estudiar el aspecto semiótico de ser vivo como un “objeto-centauro”. Un “objeto-centauro” se caracteriza por la heterogeneidad, la heterojerarquización, y la heterocronicidad; es decir, tiene muchas dimensiones semánticas reflejadas en imágenes descriptivas y descriptibles de forma interdisciplinar, y cada una de ellas es descrita como una unidad de sustrato con su sentido. La organización somática y fisiológica del ser vivo funciona como “semantóforo”<sup>100</sup> es decir, como un exponente de la semiótica en los Umwelten, cuya naturaleza o sustrato es importante para su desempeño semiótico. En otras palabras, es una combinación de la significación de *semáforo semántico*, donde el sentido es el factor regulador de las actividades receptoras y decodificadoras de las formas (RF o formas receptoras) y las sustancias (RS o sustancias receptoras).

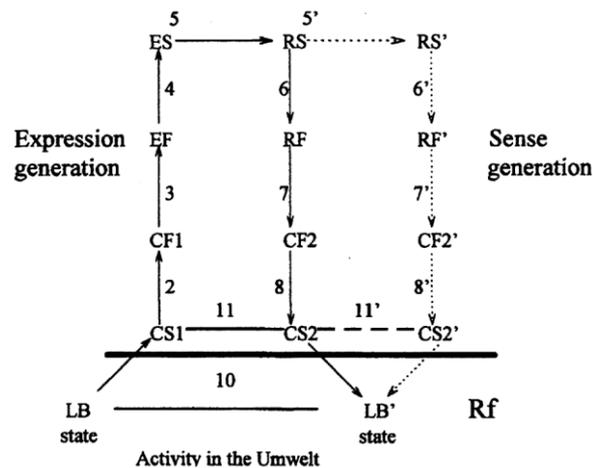


Figura 2. Estructura general del medio semiótico. (Chebanov, 1999). La parte izquierda de la figura muestra las conexiones entre el de contenido de sustancias 1 (CS1), que representa algunas ideas no estructuradas que reflejan la actividad de un organismo vivo (LB) en su Umwelt, y la forma de significado (contenido-forma 1 – CF1), así como su las relaciones con la unidad de forma de expresión EF y sustancia de la expresión ES. Este plan de expresión se transforma en (ver rel. 5 orientado a la parte derecha de la figura) un plan de la recepción (que consiste en la sustancia receptora RS (RS') y la forma receptora RF (RF')), que genera un nuevo plan de contenido (CF2 y CS2) afectando a la actividad del organismo LB en el Umwelt. 5'-transformación adicional o plan de recepción (reimpresión, reescritura, extracción de células, etc.).

<sup>99</sup> <http://home.comcast.net/~sharov/biosem/chebanov/seminar.htm>

<sup>100</sup> Tanto el concepto de “semantophore” como el de “objeto-centauro” son acuñados por el padre del Círculo Metodológico de Moscú, Georgii Petrovich Shchedrovitskii (o Tshedrovitski) (1929-1994) y incluidos en Schedrovitsky, G. P. (1971) *Configuration as a method of construction of complex knowledge*. Systematica, 8, 4; y Schedrovitsky, G. P. (1982) *Methodological organization of systems-structural research and development: principles and general scheme*, General Systems, XXVII. En Chebanov, S. V. (1998) *The Role of Hermeneutics in Biology*. En: Peter Koslowski (Ed.): *Sociobiology and Bioeconomics. The Theory of Evolution in Biological and Economic Theory*, Berlin, Heidelberg, New York (Springer) 1998, pp. 141-172, Cap. 6. (=3D Studies in Economic Ethics and Philosophy, vol. 20).

Símbolos: estado del organismo (LB): estado inicial del ser vivo, LB' estado después de la comunicación; CS1 y CS2 (CS2'): contenido- sustancias del donante y del receptor; CFL y CF2 (CF2') sus formas- contenido; EF expresión-forma, ES expresión- sustancia, RS (RS') sustancias receptoras, RF (RF') formas receptoras, Rf mundo de referentes empíricos.

Los casos biohermenéuticos trabajados por Chebanov nos lleva a un estadio de biohermenéutica molecular introducida en los mecanismos de la genética. Por ejemplo, en primer lugar, la importancia de la sustancia de la expresión 1 se revela. Por lo tanto, la frecuencia de las mutaciones puntuales, debido a la propiedad isomórfica del contenido de la sustancia 1 y de la expresión de la sustancia 1, se trata como un resultado de la tautomería<sup>101</sup> de nucleótidos de ADN (Ladik 1972). El nivel necesario de la mutabilidad se mantiene por la corrección de una parte de las mutaciones de los sistemas de reparación. Entonces, al igual que la importancia del autor y del copista y su relación en la hermenéutica, el contenido de la sustancia 1 y los procesos de transcripción del ARN-m, la traducción y la maduración llegan a ser importantes la semántica como la que determinar la sustancia de la expresión un “significado” (relaciones de 2-4 en la Fig. 2). Entonces la expresión de sustancia 1 no es un mero accidente o un ayudante, sino que es de vital importancia.

En segundo lugar, el papel de la diversidad se hace evidente. En la biosíntesis (realizado a partir de la decodificación de un texto para su interpretación), la atención se centra en la degeneración del código, el cambio de marco, la interacción de los elementos reguladores, y el empalme - todo esto con tal de que se de la correlación necesaria del contenido 1 y la expresión 1, con un gen que sea capaz de responder para la síntesis de hasta 15 productos. Los péptidos pueden ser interpretados aún más diversamente (rel.6-8) cuando su actividad depende del estado de la célula; los cambios de estado de células son como una imagen personal del mundo, como resultado de una comprensión de un texto.

En tercer lugar, algunos procesos (rel. 5-9) consisten en la actividad de los centros de fermentación (expresión-forma 2) de las proteínas relacionadas (expresión- sustancia 2), formadas por estructuras terciarias y cuaternarias (rel.5). Se cambia la proporción de sustrato y de producto (contenido-forma 2), generando los cambios en los procesos fisiológicos (contenido-sustancia 2) característicos del estado de la célula (el Umwelt intracelular en el sentido de Jakob von Uexküll de - Uexkull / Kriszat 1934). Por lo tanto, los textos genéticos funcionan como performativos, la interpretación de los símbolos genéticos se llevan a cabo dentro de una célula.

En el reconocimiento intercelular, este grupo de procesos pertenecen tanto el reconocimiento inmunológico como la penetración de un virus en una célula o la de un

---

<sup>101</sup> Tautomería es la propiedad por la que dos compuestos químicos de idéntica composición pueden intercambiarse entre sí mediante la modificación en la posición relativa de alguno de sus átomos y enlaces. Tautómeros (del griego tauto = igual y griego meros = la parte) se denominan dos isómeros que se diferencian sólo en la posición de un grupo funcional. Entre las dos formas existe un equilibrio químico. En un equilibrio tautomérico hay migración de un grupo o átomo. Ladik, J. (1972) *Quantenbiochimie fur Chemiker und Biologen*, Budapest (Akademiai Kiado).

espermatozoide en un óvulo, la interacción de las hormonas con células-objetivo (target-cell), la de un mediador, la membrana postsináptica y otras señales moleculares. Nosotros contemplamos también la comunicación quimiotáctica y la discriminación del Umwelt en la toma de decisiones para la motilidad. En principio, el esquema es el mismo, pero se ha iniciado por componentes RS'-RF'-CF2'-CS2' secretadas por una célula (rel. 5'), mientras que el semantóforo puede ser modificado al adquirir RS' como su "expresión". A continuación, los grupos funcionales o dominios (RF') son para ser reconocidos por los receptores correspondientes de la membrana, y son para cambiar su estado (CF2'), a fin de iniciar el proceso relacionado (CS2') modificando el estado de una célula que, en su vez, puede indirectamente (rel.10) influyendo en el genoma de la primera célula (el componente epigenético). El reconocimiento intercelular se acumula en la comunicación intraorganismica, utilizando las cadenas de contactos intercelulares (sistema nervioso) o semantóforos producidos por algunos y se transfieren a otras células (hormonas). En el caso de los mohos mucilaginosos – más concretamente en el *Physarum polycephalum* – el reconocimiento intercelular se verá afectado por las señales que alcanzan tanto a las invaginaciones de la plasmalema y a la superficie de la plasmalema como partes de la membrana que son receptoras de las señales que llegan a la pared ectoplasmática del mixomiceto. Los contactos con el exterior pueden provocar modificaciones del estado plasmodio a esclerocio en caso de un Umwelt adverso tanto a la nutrición como a la resistencia de la luz, el calor o la carencia de humedad, por ejemplo.

Para nuestro trabajo de investigación nos es fundamental la posibilidad de tener una interpretación justa de la transformación de las señales del Umwelt del organismo, provenientes del medio o también de otros organismos – sean alimento como algunas bacterias o la avena, sean otros plasmodios, etc. El comportamiento del organismo dependerá de la capacidad de discernimiento de las señales transducidas y su capacidad de inducir una motilidad u otra, según su condición favorable o desfavorable para su supervivencia. Por este motivo, no sólo debo de concentrar la mirada en la interpretación que ha de hacer el biólogo con los organismos estudiados (fase hermenéutica ligada a las equivalencias homeomórficas de las ciencias). También es de fundamental importancia la capacidad de estudiar cómo la vida se interpreta a sí misma en su condición intrínseca. Este es un planteo que han desarrollado de forma complementaria Andreas Weber y Anton Markos.

### **Andreas Weber y el valor de la subjetividad biológica**

Andreas Weber, del Instituto de Estudios Culturales de la Humboldt-Universität zu Berlin, utiliza las interpretaciones de Uexküll, de Hans Jonas y de Francisco Varela, así como las pulsaciones registradas del mundo anglosajón para la superación de la interpretación mecanicista de los fenómenos de la vida. En el artículo de Weber y Varela (2002) resitúan la 'autopoieticidad' en una historia de las teorías de la finalidad inmanente que se extiende desde Kant a Hans Jonas y su teoría del metabolismo. Se dijo claramente que la 'autopoieticidad' no debe ser entendida como unateleología

encarnada que permite a los autores concluir que “la ‘autopoieticidad’ es la base empírica necesaria para la teoría Jonasiana del valor”:

“El punto de partida fundamental es que la vida dice "Sí" a sí mismo. En el deseo de seguir éste se declara en sí mismo como un valor [...] Entonces, ¿podemos decir que la mortalidad es la puerta estrecha a través del cual el valor – lo abordado por "Sí" – entró de otro modo en un universo indiferente? [...] La sensación<sup>102</sup> es la principal condición para que algo ‘valga la pena el esfuerzo’. Algunas ganancias son la única realidad como un hecho para la sensación y como la sensación de aquello dado. La mera presencia de una sensación, cualquiera que sea su tipo, es infinitamente superior a la total ausencia. Por lo tanto, *la capacidad de sentir*, ya que se produjo en el organismo, es el valor – madre de todos los valores” (Jonas 1992: 87–88)

Es entonces que la reflexión de Andreas Weber sobre el valor de Hans Jonas conecta con la generación de una individualidad subjetiva que depende del metabolismo, cuya composición depende a su vez de la percepción, la movilidad y la sensación del organismo (Jonas 1973). Por lo que la sensación es el *interpretante* necesario para constituir una entidad biosemiótica, o mejor dicho un “*agente biosemiótico*” (Weber 2002a) y esta es la posición con la que voy a desarrollar los aspectos cognitivos mínimos que permitan a los organismos sin sistema nervioso tomar una condición de agencialidad biosemiótica (biosemiotic agency) superior a la conducta adaptativa meramente reactiva.

La vida orgánica es descrita por Weber como una continua auto-creación de la sensibilidad, y de la evaluación del significado o *representamen* de Peirce que está en función del entorno, del sujeto o entidad viva contra el telón de fondo de la posibilidad de la muerte. La vida, toma participación en el organismo como motor del interés por la integridad física y el cumplimiento de determinado proceso con las redes generadas por el organismo, no tan solo en los análisis, sino también en los procesamientos de los objetos del Umwelt, así como en procesos aún no puestos en marcha, como por ejemplo una intencionalidad de fagocitosis de una ameba y la generación de pseudópodos para dirigirse al foco de alimentación. De esta forma, Weber bordea entre el reduccionismo neodarwinista y el diseño inteligente sin diseñador, donde el autodiseño es una forma de autopoiesis compleja. Destaca la subjetividad del “otro” y aborda el tema desde el punto de vista de la autopoiesis: un organismo es un conocimiento integrado, pero fundamentalmente un proceso de constitución de una identidad (Weber 2001b; Varela 1997). Para Weber los seres vivos están por encima de lo concernido de ellos, reconocen los valores, y manifiestan, a través del lenguaje del cuerpo, su interioridad (la

---

<sup>102</sup> La traducción de “feeling” es tanto sentimiento como sensación. En el contexto de mi investigación, la traduzco como “*sensación*” emparentado con el concepto de “irritabilidad” y “sensitividad”; dado que los organismos sin sistema nervioso no puede ofrecer una complejidad cognitiva de “emoción por vivir” como un sentimiento primario, tal como podrían tener otros organismos más complejos como en el caso de los mamíferos. Para la traducción de “wishing” como “*deseo*”, en mi contexto está relacionado como un “propósito”, que encaja como “teleonomía intrínseca” del organismo de Weber, y en mi tesis como “encaje teleonómico”. Nota del autor.

"elocuencia" del cuerpo). Weber niega la validez del "genocentrismo" de la biología contemporánea y lleva los genes no como instrucciones, sino como *meras alusiones* para el ser vivo. Esto quiere decir que, aunque la identidad orgánica se explica por similitud genética, las "unidades existenciales" no pueden ser definidas por homogeneidad genética. "Los genes pueden ser secuenciados, pero no se tienen en cuenta para la integridad de un organismo entero" (Weber 2001b). De hecho es lo que explican Linn Margulis y Guerrero (1991) "La identidad no es un objeto, es un proceso con las direcciones de todas las diferentes direcciones y dimensiones en que se mueve, y lo que no puede ser tan fácilmente fija con un solo número". De hecho, hay partes del genoma que se pierde durante la ontogenia. Por eso, la individualidad no coincide con la homogeneidad genética, ni definida como "igualdad genética" (Chernyak y Tauber 1991).

Según Weber (2001b) sólo mediante la adopción de un criterio funcional en cuenta, como es el establecer el "self" por un proceso de identidad, podemos evitar las nociones sustanciales en la definición de lo que es un organismo. Self que es un proceso sujeto a cada organismo. Ahora bien, para hablar de un proceso de identidad, sin embargo, inevitablemente se ha de introducir el punto de vista semiótico.

Es interesante observar que la compleja red de un ser vivo está en una clara oposición al intento de reducir los procesos biológicos a una linealidad de principio causal genético. Los genes pueden así ser visto como una parte de un contexto regulador más amplio. Un sistema, que no reacciona directamente a un input, pero que actúa de acuerdo con su disposición interior, no está estrictamente ligado a la causalidad mecánica. Es decir, que su autonomía depende, como propiedad emergente, del régimen de interacciones de la composición del entorno o del ambiente que le afecta con los compuestos internos de sus orgánulos u órganos. De esta forma el Umwelt se convierte en un importante parámetro de autoregulación compleja. Miramos de entender si existen tantos órganos receptores y efectores como para captar todas las composiciones bioquímicas y las condiciones biofísicas del entorno que es afectado el organismo, o ha ido apareciendo círculos funcionales evolutivamente a medida de que se han agregado variables en el entorno. Es decir, si es un desarrollo biyectivo o es un proceso a ir cubriendo hasta que ontogénicamente el organismo adquiere una completa autoregulación. Esta pregunta sirve tanto para el sistema inmunológico como para organismos protistas o ameboides que apenas han desarrollado cambios evolutivos, como los mixomicetos. Estos también participan de la identidad biológica (aparte de la genética) aunque el tema de la individualidad es un rasgo que se diferencia según si es un autentico plasmodio (escintio multinuclear) como el *Physarum polycephalum*, o si es un pseudoplasmodio (unidad multicelular) como el *Dictyostelium discoideum*.

Weber (2007) aboga por un estudio de los parámetros subjetivos que comporta la sensibilidad de todo organismo vivo. No se puede desdeñar de la biología la composición de las sensibilidades y/o irritabilidad de cualquier organismo que está interaccionando con su Umwelt. De hecho sólo actúa el organismo a aquellos elementos del entorno (*Umgebung*) que existe percepción y del que obtiene recepción de señales

de cualquier clase (química, háptica o de contacto, lumínica, alimenticia, tóxica, radiación, temperatura, pH, etc.). Weber denuncia que ya a la segunda mitad del siglo XIX se estaba haciendo todo lo posible para rechazar la sensación de la naturaleza del estudio de la naturaleza, es decir que dejaba inválido epistemológicamente el estudio de la sensibilidad o de las sensaciones en los organismos, puesto que perturba el análisis de los componentes anatómicos y fisiológicos que pueden controlar el comportamiento.

Sin embargo en el interior de los organismos hay un sinnúmero de detalles nuevos que hay que tratar de darles sentido. Mientras mayor ha sido la tecnología de observación y de medición de los circuitos funcionales de los organismos – sea la fotosíntesis en las plantas o ciclos de Krebs o cualquier otra ruta metabólica – mayor ha sido la calibración de la construcción y de su funcionamiento en términos matemáticos, bioquímicos o biofísicos. Pero sus descripciones no determinan sus explicaciones en términos propios de los organismos, sino de los factores de descripción. Una enzima siempre será una proteína que interviene en la catálisis de una reacción en un proceso de aceleración de la propia reacción. Mas su “ser-en-el-mundo” no tiene mayor significado que su funcionalismo. Pero en un organismo vivo, su “ser-en-el-mundo” si tiene una lectura biológica, su significado ulterior será “permanecer en el ser” aunque acabe siendo un “ser-para-la-muerte”. Es como si la visión espinosista de la meta del ser vivo es su propia supervivencia, por encima de su entrega a un tiempo de vida donde cada ser vivo tiene su frame privado de su especie, y percibe el tiempo biológico de otro organismo de otra especie sin su frame propio del organismo observado, sino del observador (o perceptor). Este permanecer vivo es un propósito o, mejor dicho una “*teleología intrínseca*” (Weber y Varela 2002) propia de la naturaleza viva de los organismos, por muy simples que sean.

No obstante existen escalas de estructuras organizativas donde el factor individual de supervivencia se ve modificada por un sacrificio de cara a la complejidad evolutiva de un ciclo vital de orden superior. Esto lo demuestra por ejemplo los ciclos vitales de los mixomicetos y de las mixobacterias, en cuando se reagrupan para generar un cuerpo fructífero compuesto de millares de células que han generado el tallo o la copa donde aguardan otras células esporíferas que se esparcirán aleatoriamente para proseguir dicho ciclo. Estas células de la copa y del tallo del cuerpo fructífero se han sacrificado para restablecer el ciclo vital. Actualmente se desconoce si hay un gen determinado que se active para la actividad auto-aniquiladora o si hay un factor epigenético de clasificación celular para la distribución de las partes del cuerpo fructífero. Sin embargo que se desconozca si el factor auto-aniquilador y de redistributivo es o no genético o epigenético, no descarta su posibilidad, por lo que tampoco descarta la autoreferencia individual de cada célula y su destino dentro de un plan genéticamente autoregulado. Por lo que podemos entender la posición de Uexküll a la hora de explicar en 1920 en su *Theoretische Biologie* que existe una *conformidad a plan* o “*Planmäßigkeit*” que establece la dinámica autogenerada por el organismo con el objetivo de establecer una estabilidad tanto a nivel estructural como a nivel fisiológico y de interacción con su Umwelt para su maximización de la sensibilidad interactiva, la biocomunicación y la

transducción biosemántica de las señales percibidas. Pero también se entiende que cada organismo tenga una individuación significativa para el propio organismo, donde la agencialidad y la normatividad prevalezcan en la perseverancia de su supervivencia. A esta tonificación del organismo Uexküll (1940 /1942) la denominó “Ichton” o “tonos del yo”<sup>103</sup> donde la autoinducción del circuito funcional permite establecer la calidad de sensibilidad perceptiva (irritativa) del entorno e integrar mejoras en aquellos circuitos funcionales para las tomas de decisión a la hora de elegir un alimento u otro, o conducirme por un lugar adverso para la obtención de dicho alimento. La calibración de los parámetros es un factor ontogenético de mejora cognitiva procedimental para todo organismo con o sin sistema nervioso. Lo que me permitirá establecer más tarde si es posible una cognición (sea representacionista o no-representacionista) donde un organismo ameboide pueda establecer unos parámetros mínimos de actuación donde la irritabilidad o el hambre transforme las señales en signos significativos para la supervivencia. Por eso hemos de entender al organismo vivo en sus parámetros de individuación. Lo que resulta extremadamente difícil por la incapacidad cognitiva de “como ser un murciélago” de Tomas Nagel, percibiendo y sintiendo como un murciélago. Para el caso de una ameba, el factor de distancia filogenética hace mayor el recorrido de nuestra incapacidad tecnológica de “sentir” como una ameba y más aún “sentirse ameba”.

Aunque parece que estamos trabajando en un círculo que no tiene nada que ver con la biología, de hecho es lo que Weber recrimina de la objetividad científica de la biología y sus áreas de investigación: que no puede ni sabe cómo medir dicha subjetividad. Es decir, hay posibilidad de que siendo un observador científico humano, pueda medir e interpretar los sentidos de los organismos de forma que no deforme la medida del umbral mínimo de irritabilidad de cada organismo y comprendamos que dicha sensibilidad ajusta la capacidad cognitiva de cada individuo en la capacidad que tenga cada eslabón de su taxonomía filogenética de responder a ítems de cognición. Eso es así puesto que, como dice Weber, hay que entender a los organismos como sistemas inteligentes de diferentes grados de complejidad, que interpretan y evalúan su entorno, y que no actúan ciegamente a los estímulos recibidos.

Si la subjetividad de cada organismo es el motor fundamental que moviliza la actuación de “ser-en-el-mundo” la complejidad biológica y en los fundamentos biotecnológicos para su estudio está servida. Dejaríamos de vaguedades psicológicas o conductuales que caricaturizan la realidad del organismo vivo y enriquecería los estudios biomecánicos y biomiméticos de cara a una fehaciente simulación (que no un mero y vago simulacro) de lo que Uexküll denominaba la *Gegenwelt* (un contra-mundo) como factor desencadenador del *Innenwelt* (el mundo interno del organismo). Estudiaremos más adelante la posibilidad de que los organismos sin sistema nervioso estén viviendo su *Umwelt* a través de su mundo interno biofísico y bioquímico con un contra-mundo o

---

<sup>103</sup> En la traducción de José M. Sacristán de “Bedeutungslehre” denomina “Ichton” como “sonido del yo”, en inglés es traducido como “*ego-quality*” pero yo mantengo el sentido metafórico musical y físico de “tono del yo”.

Gegenwelt mínimoal carecer de nervios. Sin sistema nervioso susceptible que los órganos receptores y efectores de dichos organismos permitan establecer un círculo funcional mínimo que permita la representatividad, por lo que posiblemente estemos hablando entonces de cognición sin representación (Brooks 1987).

### **Organicismo y Organicismo Cualitativo**

Para poder seguir el discurso en la coherencia biosemiótica que nos permita alcanzar un replanteamiento de la cuestión sobre la cognición en los organismos sin sistema nervioso, voy a integrar una perspectiva de la filosofía de la biología que nos puede ayudar a afinar los enlaces experimentales como sistémicos de la actual biología en mor de una biología teórica que abra su espectro de gestión en una capacidad hacia la transdisciplinariedad que hemos visto anteriormente.

De hecho, hablar de organicismo en biología ha sido durante mucho tiempo hablar de una postura teórica incómoda, tanto para neodarwinistas como para experimentales que no entran en cuestiones teoréticas que obstruyan su desarrollo de investigación.

El término “organicismo” ha sido erróneamente representativo de algunas consideraciones científicas del siglo XIX en tanto que era una propuesta sociológica empleada como modelo comparativo análogo a las células de un organismo. Alfred Espinas, Paul von Lilienfeld, Jacques Novicow, Albert Schäßle, Herbert Spencer, y René Worms , entre otros asociaron a la sociedad como un todo orgánico, pudiendo ser desviada dicha atribución a una asociación política totalitarista, sea nazista como comunista, donde los enfoques holísticos eran maquiavélicamente desarrollado con el sentido utilitarista que se le puede ofrecer a que “el todo es más que la suma de sus partes”.

En biología el organicismo considera que las estructuras observables de la vida, su forma general y las propiedades y características de sus partes componentes son un resultado de la jugada recíproca de todos los componentes en la otra. [6] Ross Harrison, Paul Weiss, y Joseph Needham, J. S. Haldane, al igual que Ludwing von Bertalanffy fueron los primeros biólogos organicistas del siglo XX. Robert Rosen, fundador de "Biología Relacional" proporcionó un tratamiento matemático y la categoría de teoría integral de las relaciones causales irreductibles él cree que son responsables por la vida .

Según Ernst Mayr (1982), William Emerson Ritter presentó la tercera escuela de pensamiento: el organicismo. Mientras que el término “organicismo” había sido utilizado antes, Ritter fue el primero en utilizarlo para fines biológicos y crear una teoría de la misma. El organicismo creía que la vida era interrelaciones entre los seres vivos, que viven en una red compleja. Hoy en día, el organicismo podría llamarse la teoría de sistemas. En 1918, Ritter escribió su tomo organicista, La unidad del organismo, lo que él creía que era su obra magna.

De hecho el organicismo es una filosofía de la biología que no apuesta ni por el mecanicismo fisicalista ni por el vitalismo metafísico. Refleja una observación de la

biología que conjuga con los resultados de la biología experimental con la observación integradora de los organismos en su entorno, estudiando sus interacciones en sistemas consistentes integrados.

A principios de 1930 Joseph Needham, Joseph Henry Woodger, Conrad H. Waddington y Dorothy Wrinch formaron el Club de Biología Teórica, para promover el enfoque organicista de biología. El club estaba en la oposición al mecanicismo, el reduccionismo y la vista genocéntrica de la evolución. La mayoría de los miembros estaban influenciados por la filosofía de Alfred North Whitehead. Sus ideas acerca de la organización del universo como un único organismo ofrecen no una ingenua disposición hacia lo que denominaba una realidad de procesos. Pretendía ver el mundo como una red de procesos interrelacionados de las que somos parte integral, de modo que todas nuestras decisiones y acciones tienen consecuencias para el mundo que nos rodea.

Un evento tiene que ver con todo lo que hay, y en particular con todos los demás eventos. Esta “interfusión” de eventos – como diría Whitehead – se realiza por los “eternos” aspectos de los objetos, tales como colores, sonidos, olores, y características geométricas, que son necesarios para la naturaleza ni son emergentes desde ella. Tal objeto “eterno” será un ingrediente de un evento bajo el disfraz o el aspecto de la calificación de otro evento. Hay una reciprocidad de los aspectos que no son patrones de aspectos. Cada evento corresponde a dos patrones, a saber, el patrón de los aspectos de otros eventos que se capta en su unidad y el patrón de sus aspectos que otros eventos solidariamente captan en sus unidades.

Un organismo principal se identifica como la emergencia de algunos patrones particulares que ha sido captado en la unidad de un hecho real. Hay por tanto una intrínseca y extrínseca realidad de un evento, es decir, el evento en su propia aprehensión y el evento como en la aprehensión de otros eventos. El concepto de la interacción de los organismos. Las relaciones de eventos son constitutivos de lo que los eventos son en sí mismos. En el mundo físico-químico, de acuerdo con Whitehead, el concepto del organismo podía haber llegado a ser como una filosofía de la ciencia mucho más satisfactoria que la que subyace con la física clásica newtoniana. Es como si una ecuación más inclusiva se hubiera desarrollado, de la que, como podría haber hecho Lagrange, se podría obtener todos los resultados de la física newtoniana, con sus modificaciones de Einstein.

Por lo tanto, en la teoría orgánica de la naturaleza, se ve todo el universo consistiendo en totalidades, u organismos, cuyas partes – como Lloyd Morgan diría – van en unidad sustancial, o en otras palabras, son sólo a sí mismos, siempre y cuando permanezcan en sus lugares naturales dentro del conjunto al que pertenecen. Para las relaciones constitutivas, o partes, no son entidades que tienen una existencia en sí por derecho propio, sino sólo en virtud de su posición y función en el organismo del que forman parte. Esta relación o unidad es el sello de un organismo, y puede observarse que puede entrelazar con otros organismos, al igual que un organismo vivo y su entorno es inextricablemente entrelazado. El universo, desde el punto de vista de Whitehead, es

una amplia gama de organismos, de montaje desde las totalidades atómicas más simples hasta el organismo-mundo, una traducción moderna de “anima mundi” en sí.

Pero la historia de la ciencia no ha hecho tampoco apoyo a esta línea de pensamiento biológico. Lo cierto es que sigue siendo molesta la percepción organicista de la biología, al haber sido tachada de una tercera vía que no lleva más que a conceptos holísticos no útiles experimentalmente, aunque hayan podido ayudar a las observaciones fisiológicas de la biología.

Más aún, hay una sombra de pan-psiquismo que incomoda a muchos biólogos evolucionistas, contrarios a las ideas de Whitehead. Él vio la naturaleza básica del mundo como compuesto de eventos y el proceso de su creación y la extinción. Estos sucesos elementales (que él llamó ocasiones) son en parte mentales. Para alguien como Alfred North Whitehead, la descripción en tercera persona ocupa un segundo lugar respecto a la íntima conexión entre todas las entidades y todo lo demás, que es, según él, la estructura misma de la realidad. Ahora bien. Whitehead se preocupó en evitar caer en lo que él llamó la “falacia de la concreción fuera de lugar”, denominada también como “reificación” en la concepción de una realidad mental no abstracta de lo existente.

Según Whitehead, uno comete la *falacia de la concreción fuera de lugar* (fallacy of misplaced concreteness) cuando uno confunde un resumen, una creencia, una opinión o un concepto acerca de cómo son las cosas con una realidad “concreta” tangible; en resumen tomar por concreto algo que es fruto de una abstracción. Tal como expresa Alfred Korzybski “*el mapa no es el territorio*”<sup>104</sup>, Whitehead propuso la falacia en una discusión sobre la relación de la localización espacial y temporal de los objetos. Él rechaza la idea de que un objeto físico concreto en el universo puede atribuirse una sencilla extensión espacial o temporal, es decir, sin referencia de sus relaciones con otras extensiones espaciales o temporales.

“... Entre los elementos primarios de la naturaleza como aprehendida en nuestra experiencia inmediata, no hay ningún elemento que exista que posee este carácter de ubicación simple. ... [En cambio,] yo sostengo que por un proceso de abstracción constructiva podemos llegar a abstracciones que son los bits simplemente ubicados en la materia, y en otras abstracciones que están en las mentes incluidos en el esquema científico. En consecuencia, el error real es un ejemplo de lo que he llamado: La falacia de la concreción fuera de lugar.”<sup>105</sup>

Si conceptos tales como “punto”, “instante”, “espacio”, “tiempo”, “conciencia” son buenos ejemplos de dicha falacia de la concreción fuera de lugar o reificación, también lo es el concepto de “vida”. De hecho, la pregunta por la vida es una reificación en tanto

---

<sup>104</sup> Alfred Korzybski acuñó la expresión en "*un sistema no-aristotélico y su necesidad de rigor en Matemáticas y Física*", un documento presentado ante la Sociedad Americana de Matemáticas en la Nueva Orleans, Louisiana, reunión de la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia , 28 de diciembre de 1931. Reproducido en *Science and Sanity*, 1933, p. 747-61.

<sup>105</sup> Whitehead, Alfred North (1925) [1919]. *An Enquiry concerning the Principles of Natural Knowledge* (2nd ed.) Cambridge University press.

que hacemos referir a un concepto abstracto a billones de ejemplos orgánicos. Estudiamos incluso la vida “in vitro”, donde el organismo ha dejado de ser un ser vivo a ser un “ser para la ciencia de los seres vivos”, aislado de las interacciones del entorno vivo... ¿no parece esto también otra reificación?

El profesor danés Claus Emmeche, de la Universidad de Copenhague y jefe del Center for the Philosophy of Nature and Science Studies at the Faculty of Science (CPNSS, Niels Bohr Institute) reflexiona sobre el criterio de la vida estudiada por la biología y su explicación deconstructiva en los laboratorios de investigación.

Emmeche (2011) comenta que el organicismo, en su forma principal respalda estas tesis: (a) el “no vitalismo” (no hay poderes ocultos no físicos deben invocarse para explicar los fenómenos de vida); (B) el “nomecanicismo” (fenómenos que viven no pueden ser completamente descritos simplemente por principios mecánicos, ya sea clásica o cuántica); (C) el “emergentismo” (nuevas propiedades auténticas son características de la vida en comparación con los sistemas no vivos “puramente” físicos) lo que implica irreducibilidad ontológica de, al menos, algunos de los procesos de la vida (aunque el reduccionismo metodológico es totalmente legítimo); (D) la teleología de los fenómenos de vida (en su carácter de propósito) es real, pero al menos en principio explicable como resultante de las fuerzas de la variación ciega y la selección natural, además de con el tiempo adquiere un poco de “orden por grados libertad” (auto-organización fisicoquímica)(Emmeche 2001).

¿Qué se estudia dentro de una perspectiva organicista? Pues por ejemplo, propiedades emergentes son vistas como estructuras materiales y procesos dentro de varios niveles de los sistemas de vida (los sistemas de desarrollo, evolución, las redes genéticas y bioquímicas, etc.), todos los cuales son tratados como objetos con propiedades no intrínsecamente experienciales. Mayr (1997) reconoció que posición como organicista y el organicismo corriente principal fué ampliamente aceptado entre los biólogos, a pesar de que la posición a menudo se confunde con el vitalismo (véase también El-Hani, Emmeche 2000; Gilbert, Sarkar 2000).

En consecuencia, no hay obstáculos de principio para la construcción científica de la vida y la mente como fenómenos emergentes por métodos evolutivos o de abajo hacia arriba (bottom up).

Penetrando en los conceptos fenomenológicos introducidos por Jakob von Uexküll en el estudio del Umwelt y el Innenwelt, Emmeche interpreta con gran acierto la posición uexkülliana del mundo interno de los seres vivos y su insistencia en considerar su subjetividad como fundamento de estudios biológicos. Emmeche (2001) denomina a esta observación fenomenológica del fenómeno sintiente o perceptivo del medio envolvente y de las diversas propiocepciones, en su multiplicidad de gradaciones sintientes, como “*organicismo cualitativo*”. De hecho, la propiocepción es un hecho biológico teóricamente aceptado e incuestionable por parte de Uexküll, que le permite anticiparse en una idea de la etología basada en los hábitos reforzados por las condiciones de percepción de los organismos, tanto si poseen o no sistema nervioso.

Esto puede ser equiparable a los modelos autopoiéticos estudiados por Varela cuando habla de las fluctuaciones de la membrana celular como fuente de autonomía y de adaptación. Ikegami y Suzuki (2008) dejan claro que, en un sistema protocelular, los sistemas motor y sensorial no pueden ser independientes de los procesos de automantenimiento<sup>106</sup>. En los sistemas de células primitivas, el metabolismo de los componentes de la membrana es considerado como la reconfiguración del aparato sensorial, en el sentido de que cambia las propiedades de penetración. Por otra parte, la misma membrana puede funcionar como una forma primitiva de actuador. Hay evidencia de que esa dicotomía que sucede en los sistemas de vida real. El movimiento de los mixomicetos se logra mediante la disolución y la recreación continua de la membrana con el protoplasma de flujo.

Moreno y Etxeberria (2005) argumentan que el comportamiento de adaptación de una sola célula (por ejemplo, avanzar hacia un entorno fértil mediante la detección del gradiente químico) es el resultado de satisfacer la restricción de viabilidad a través de una red metabólica interna<sup>107</sup>. Por eso, relación entre la cognición y la restricción de viabilidad es directa. Estudiaremos más adelante la condicionalidad de la cognición en relación con la restricción de alimentación, es decir, con el hambre. También Moreno y Etxeberria (2005) sostienen que el comportamiento de adaptación de una sola célula en movimiento hacia un ambiente propicio mediante la detección del gradiente químico es el resultado de la evolución de las redes metabólicas, al igual que la auto-preservación y auto-movilidad puede ocurrir de forma sincrónica en un sistema protocelular.

Mas Emmeche lo que quiere expresar es que hay una semiótica espontánea en la organización de la vida que fundamenta la comunicación biológica como un fenómeno imbricado a partir de sistemas biológicos de complejidad simples como procariotas o protistas. La comunicación se relaciona con el “crecimiento de la organización cualitativa de la naturaleza” que permite estrategias de supervivencia. Como hemos expuesto anteriormente, la comunicación biológica se fundamenta en señales que ofrecen determinada información. La información es considerada como un microestado de un sistema influyendo a la elección de un sistema de trayectorias hacia puntos de bifurcación, afirma Alexei A. Sharow<sup>108</sup>. El “sentido” (sense) de la información tiene dos componentes: significado o propósito (meaning) y valor o importancia (value). El significado es una colección de prohibiciones y restricciones para la información sobre las trayectorias de un sistema de desarrollo y de conductas. Y el valor es medido por la contribución de información hacia la seguridad del automantenimiento y la autoreproducción del sistema. Significado y valor son considerados como el nivel material e ideal. Información que puede considerarse de cinco tipos, según Hovard

---

<sup>106</sup> Ikegami, T., Suzuki, K. (2008) *From a homeostatic to a homeodynamic self*. BioSystems N° 91. pp. 388-400.

<sup>107</sup> Moreno, A., Etxeberria, A. (2005) *Agency in natural and artificial systems*. Artif.Life 11, pp.161-175.

<sup>108</sup> Sharow, A. A. (1991) *Biosemiotics: Functional-Evolutionary Approach to the Analysis of the Sense of Information*. En: T.A.Sebeok and J. Umiker-Sebeok (eds) *Biosemiotics*. The Semiotic Web 1991. Mouton de Gruyter, New York, 1992, pp. 345-373.

Patee (2006): El primer tipo es la memoria, que puede ser tomada como una clase de estructura de equilibrio. Los otros cuatro - transmisión, transcripción (codificación), plegado y catálisis son distintas y todas ellas son de la clase de estructuras disipativas tal como Ilya Prigogine y Sungchul Ji advierten<sup>109</sup>.

El “organicismo cualitativo” es una posición más radical que difiere del organicismo corriente en su valoración de la teleología y las cualidades fenomenales. Se hace hincapié no sólo la realidad ontológica de entidades biológicas de nivel más alto (como por ejemplo, la auto-reproducción de los organismos como partes de linajes históricos), sino también *la existencia de aspectos experienciales cualitativos del comportamiento cognitivo*. Al detectar la luz o los colores, un organismo no se limita a ejecutar una detección de señales externas que luego se procesan internamente (descrito en términos de neuroquímica o procesamiento de la información); hay algo más que decir si queremos que la historia sea completa, es decir, sobre la propia experiencia de la luz del propio organismo. Esta experiencia está siendo vista como real. Se puede decir que tiene un modo subjetivo de la existencia, sin embargo, es un fenómeno real objetivamente (Searle 1992 hizo hincapié en la realidad ontológica de la experiencia subjetiva, sin embargo, la mayoría de las veces sólo se valida en un contexto humano, y eso es un error).

Como una postura científica, el “organicismo cualitativo” se preocupa no sólo con la categoría de cualidades medibles “primarias” (como la forma, magnitud y número), sino también con investigación sobre la naturaleza de las cualidades “secundarias” como color, sabor, sonido, y el sentir la conciencia cinestésica básica de los animales, así como la propiocepción del movimiento de los organismos primarios. Un ejemplo seminal del organicismo cualitativo es la que ofrece Sheets-Johnstone (1999). La teleología de los seres vivos es visto como un aspecto irreductible y esencial del movimiento viviente, en contraste con el mero cambio físico de posición. Esta teleología se atribuye a menudo a una forma genuina de la causalidad (“causación final”, cf. Vijver et al., 1998), y la evaluación del organicismo cualitativo de la “realidad” de un caso de vida artificial dependerá en parte de cómo interpretar la causalidad del sistema viviente artificial.

Queremos considerar – en este trabajo de investigación – la relación existente entre la condición de posibilidad de percepción sin representación de los organismos sin sistema nervioso, con aquellos elementos que conforman los circuitos funcionales que intervienen en el procesamiento de la información del mundo interno y del mundo externo del organismo. De este modo, ofreceremos una posible descripción de aquellos principios cognitivos mínimos que contribuyen a un organicismo cualitativo para los mixomicetos. Es decir, los principios mínimos que constituyen la receptividad de cualidades secundarias y que están ligadas a las concepciones primarias de los qualia o,

---

<sup>109</sup> Correspondencia entre Howard Patee y el profesor Sungchul Ji del Departamento de Farmacología y Toxicología de la Rutgers University. Ver Biosemiotics: 8249. Ver también: Patee, H. (2006) *The physics of autonomous biological information*. Biological Theory, Vol. 1, No. 3: 224–226.

Ji, S. (2012) *The Information-Entropy Relations*. En: *Molecular Theory of the Living Cell: Concepts, Molecular Mechanisms, and Biomedical Applications*. Springer, New York. pp. 97-101.

mejor dicho, de “*protoqualia*” según la terminología acuñada por Roberto Llinás (2003). Una “sensación subjetiva” o “*protoqualia*” ofrece una señal eléctrica o química como una función potencial de estímulo en el momento que desborda el umbral mínimo de percepción, desencadenando una acción celular coherente. Este puede ser el origen de los *qualia*<sup>110</sup> – comenta Llinás (2001) – si partiendo de ese umbral mínimo de percepción de las unidades celulares se genera sinérgicamente una amplificación geométrica de la irritabilidad de millones de células a la hora de formar un cuerpo calloso, como ocurre por ejemplo en las mixobacterias, en los mixomicetos pseudoplasmodios como el *Dictyostelium discoideum*, o en los plasmodios polinucleados como el *Physarum polycephalum*.

Aquí necesitamos saber si dichas organizaciones pueden tener mecanismos de procesamiento de sus cualidades. Esto significa dos cosas: primero *si el organismo puede tener condiciones biológicas de percepción y si él mismo se percata o no*. Aquí no entraremos en la discusión que dicha percatación tenga que ser en sí una “*protoconciencia*” o un “*pan-psiquismo*” sin funcionalismo representativo, pues no es cometido de nuestra investigación entrar en estas categorías de estudio. Y segundo, *si podemos contar con observadores o medidores de dichas condiciones*. Este sería el caso de una epistemología biosemiótica que recoga elementos o datos cuantitativos de percepción de los organismos sin sistema nervioso como elementos de segundo orden cualitativos como por ejemplo los susodichos *proto-qualia*. Aquí sí que nos interesa avanzar posibles pautas que conduzcan a una nueva epistemología. Tampoco es el objetivo directo de nuestra investigación, aunque sí lo es de forma indirecta en una discusión abierta al final de nuestra tesis.

Para nuestro trabajo sí es fundamental que podamos, al menos entrever, que los organismos más simples tienen sensibilidad frente a su *Umwelt*, su entorno decodificable (que tiene sentido para el propio organismo y su especie), y que una toma de decisión en un cometido motriz o de alimentarse comprende mecanismos de procesamiento de dar sentido su determinación para su objetivo, su telos. Esta realidad sensible y sus determinaciones de supervivencia conforman las cualidades primarias y secundarias consideradas como propiedades de la agencia del organismo. Si vemos dichas cualidades en organismos simples como en amebas, mixomicetos y protistas en general, podemos decir que las propiedades de la agencia que permiten la sensibilidad (del entorno y de sí mismo) y la percepción con percatación del propio organismo en sus estados primordiales de supervivencia son emergencias de influencia básica o de una causalidad descendente mínima, cuya superveniencia proviene de los circuitos funcionales que permiten fundamentos de los principios mínimos cognitivos como la memoria química, por ejemplo. Este va a ser el núcleo de nuestro estudio aplicativo.

---

<sup>110</sup> “Los ‘*qualia*’ humanos son la amplificación geométrica de una irritabilidad unicelular que aún no comprendemos bien (...) Sobre su origen unicelular espoco lo que puede decirse hoy por hoy, pero esta ignorancia no es una razón definitiva para pensar que son fenómenos inexplicables científicamente porque tenemos evidencia contundente de que los *qualia* están atados a la actividad electromagnética del cerebro y de que son ‘solubles en anestesia’”. Llinás, R. R. (2001), *I of the Vortex, From Neurons to Self*, MIT Press. P. 219

## Capítulo 2. Autopoiesis y la fenomenología de la cognición en biología

### Autopoiesis

#### Enactividad Autopiética

El material con el que el “mundo circundante” del sujeto observado se construye consiste siempre en una determinada cantidad de información que procesa el organismo, y con una calidad objetivada por el observador, es decir en primera persona, de acuerdo a su estructura constitutiva o Bauplan. Lo que haya en el “mundo exterior” puede tener aleatoriedad o una causística real que el observador puede contemplar de forma total, parcial o nula. Es el organismo que discrimina de la re-presentación del mundo pre-dado<sup>111</sup> aquellos fenómenos y actividades que interaccionan seres animados con inanimados y que son percibidos en función del Bauplan. En los eventos de la vida, como la captura de una presa o el propio asentamiento de un lugar para crear un nido, los organismos vivos aprehenden a interaccionar con su Umwelt para la supervivencia y un fructífero desarrollo. La actividad interpretativa que el sujeto recompone del entorno y de los objetos que puede percibir es una “hermenéutica”, que Francisco Varela<sup>112</sup> denomina como “*enactuar*”<sup>113</sup>, o “hacer emerger”<sup>114</sup> el sentido a partir de un trasfondo de comprensión. Pero qué significa dicha comprensión para seres autoorganizados unicelulares. He de decir que el conocimiento enactivo proviene específicamente de las habilidades puestas en juego en una actividad, sea secuenciada o no, y que se ofrecen de forma recurrente. Lo que quiero defender es que la enacción no es una facultad reservada a los organismos superiores que desarrollan facultades cognitivas complejas como el fenómeno de la consciencia, sino que también puede ofrecerse en organismos donde las funciones sensorio-motoras son las máximas funciones perceptoras – o mejor dicho “*percatadoras*” – del Umwelt.

Un ser autoorganizado recurre a sus mecanismos internos, denominado por Varela como “*clausura operativa*”<sup>115</sup>. En la teoría de sistemas, la diferencia entre sistema y entorno es la que hace posible que el sistema emerja, y a su vez es la diferencia mediante la cual el sistema está constituido<sup>116</sup>. La teoría de la “clausura operativa” establece que la diferencia sistema – entorno se lleva a cabo, sólo por el sistema u organismo. Esto no es excluyente para un observador del entorno que perciba al organismo. El punto crucial se

<sup>111</sup> Putnam, H. (1988) *Much Ado About No Very Much*. Daedalus, N° 117.1, winter 1988. Págs 269-281.

<sup>112</sup> Varela, F. J., Thompson, E. Rosch, E. (1991) *The Embodied Mind: Cognitive Science and Human Experience*. MIT Press. En castellano: *De Cuerpo Presente. Las Ciencias Cognitivas y la Experiencia Humana*. Trad.: Carlos Gardini. Editorial Gedisa, Barcelona 1992. Pág. 176.

<sup>113</sup> El neologismo “enacción” traduce el neologismo inglés enaction, derivado de “Enact”, que viene a significar dos acciones: bien “promulgar” una ley (hacer la propuesta de ley, aprobarla y hacerla ejecutar, bien “representar” un papel teatral o declamar (haciendo vivir) un cuento, un suceso, etc.

<sup>114</sup> “Hacer emerger” traduce la forma bring forth, a la vez asociada con el alemán hervobringen, término de orden fenomenológico. Varela, F. J. (1991) Op. Cit.. Pág. 176.

<sup>115</sup> Concepto acuñado por Humberto Maturana.

<sup>116</sup> Luhman, N. (1995) *Introducción a la Teoría de Sistemas*. Editado por Javier Torres Nafarrate. Universidad Iberoamericana. Col. Teoría Social. México.

establece allí donde el organismo o el sistema establece sus propios límites, mediante operaciones exclusivas y que únicamente debido a dichas operaciones el sistema puede interpretarlo. Estas operaciones exclusivas pueden, por ejemplo, la deyección, o la expulsión de un organismo gestado como también la puesta de un huevo o un parto, incluso una meiosis a nivel unicelular. Tanto para Francisco Varela como para Humberto Maturana, una célula es una fábrica bioquímica que trabaja con reglas y pautas internas (los programas biogenéticos) para reproducir su propia configuración. Por lo tanto es un sistema autoorganizativo, abierto al entorno en lo que se refiere al intercambio de material molecular (metabólico) y energético, y al mismo tiempo es cerrado o clausurado operacionalmente, por la supervivencia integradora. Dicha clausura se debe entonces a su autonomía operativa en conformidad al programa interno que determina las acciones básicas en que el sistema reacciona a los estímulos del entorno –donde esos estímulos actúan sobre el sistema a través de ciertos receptores internos acoplados estructuralmente al entorno. Los cambios producidos por el entorno en dichos receptores son percibidos por el sistema como “irritaciones” a los que el sistema responde según instrucciones de su programa interno. Entonces la modificación en el comportamiento de una célula, debida a los estímulos externos no surge como “efecto” directo del impulso causal exterior, sino a través de la percepción interna de los cambios en los propios receptores. Con ello Varela y Maturana llegan a concluir que el “entorno” es recibido por el sistema biológico únicamente a través de los parámetros del programa propio. Estos conceptos tienen sus equivalentes homeomórficos en los conceptos de *Umwelt* y de *Innenwelt*, en el que la percepción subjetiva del mundo circundante (*Umwelt*) y la de su mundo interno (*Innenwelt*) dependerá de los parámetros que limitan a nivel interno la sensibilidad perceptual y la posibilidad de interacción. No hay más mundo que aquel que sus órganos le permite percibir e interactuar. Uexküll enlaza sus limitaciones con los círculos funcionales (*Funktionkreises*). Dependiendo del nivel de complejidad del organismo se incrementa la complejidad de los (órganos receptores (*Merkorganen*) y los órganos de acción (*Wirkorgan*) y con ello su mundo sensible o perceptible (*Merkwelten*) y también su mundo de interacción (*Wirkwelten*)

El *Umwelt*, teniendo en cuenta nuestra “hermenéutica diatópica”, es una *enacción autopoiética*. Es decir, tal como define Maturana y Varela la autopoiesis, es la organización de los seres vivos. “Son autopoiéticos los sistemas que presentan una red de procesos u operaciones (que lo define como tal y lo hace distinguible de los demás sistemas), y que pueden crear o destruir elementos del mismo sistema, como respuesta a las perturbaciones del medio. Aunque el sistema cambie estructuralmente, dicha red permanece invariante durante toda su existencia, manteniendo la identidad de este. “Los seres vivos son sistemas autopoiéticos y que están vivos sólo mientras están en autopoiesis”<sup>117</sup>. Por lo tanto el significado de *Umwelt* como enacción sería la representación o performance del organismo y, a su vez la “emergencia” del mundo a partir de un trasfondo de identificación significativa (tanto de signos o señales como de sentido o familiarización); y a su vez autopoiética puesto que presentan una red de

---

<sup>117</sup> Maturana, H. (2004) Biología del fenómeno social.  
[http://www.ccas.org.ar/secciones/biblioteca/articulos/Biologia del fenomeno social.pdf](http://www.ccas.org.ar/secciones/biblioteca/articulos/Biologia%20del%20fenomeno%20social.pdf)

“círculos funcionales” cognitivos y de retroalimentación en “conformidad a un plan” genético que permite mantener estos círculos invariables tanto ontogenéticamente como filogenéticamente. Veremos un ejemplo del porqué de esta afirmación.

Varela<sup>118</sup> propone un ejemplo el caso de la visión, para explicitar este problema ontológico que ha preocupado a los pensadores de todos los tiempos. ¿Qué vino primero el mundo o la imagen? El ejemplo es el conocido dilema del huevo y la gallina: ¿Qué es antes el huevo o la gallina? O preguntado en clave cognitiva, ¿qué es antes la realidad o nuestra percepción de la realidad?

\* posición de la gallina: el mundo exterior tiene leyes fijas y precede a la imagen que arroja sobre el sistema cognitivo, cuya tarea consiste en aprehenderlo apropiadamente (sea en símbolos -cognitivistas- o en estados globales -conexionistas).

\* posición del huevo: el sistema cognitivo crea su propio mundo, y su aparente solidez sólo refleja las leyes internas del organismo.

Varela propone que nuestra fijación por imaginar a la mente como un sistema representacional y pasiva de la realidad-mundo es un error epistemológico que nos ha mantenido ocupados tanto tiempo precisamente por la endeblez de la realidad en mostrarse fija y también por la debilidad cognitiva de los constructos para apresarla como un Yo cuya existencia se nos escurre constantemente de entre las manos.

Varela propone una hipótesis muy osada, los contenidos mentales dibujan en su propia organización – autoorganización – un mundo sensible percibido que en parte es una emergencia, una creación autopoietica que procede del ordenamiento en clases de esos mismos contenidos mentales. Así realidad – mundo y fenómenos mentales se encontrarían en un continuo dialogo transformador. Varela opta por un camino intermedio: huevo y gallina serían coemergentes y correlativos<sup>119</sup>.

Varela quiere marcar la diferencia entre el enfoque enactivo y cualquier forma de constructivismo o neokantismo biológico en la codeterminación (mundo-visión, gallina-huevo). Mientras que por el constructivismo, Varela opta por mencionar a Paul Watzlawick, en el neokantismo biológico opta por Konrad Lorenz. Sin embargo, en Uexküll, que comparte un “*neokantismo constructivista*” en su biología del Umwelt se demuestra su vía media entre el sujeto y el mundo, a través de la idea de contrapunto en su “*Bedeutungslehre*” que es un puente de enlace interdependiente donde se ofrece la armonía de una “coordinación biológica” entre el Umwelt y el Innenwelt, entre el

---

<sup>118</sup> Valera, F. J. (1988) *Connaître: Les Sciences Cognitives, tendances et perspectives*. Editions du Seuil, Paris. En castellano: *Conocer. Las ciencias cognitivas: tendencias y perspectivas. Cartografía de las ideas actuales*. Editorial Gedisa, Barcelona 2002. Págs. 101 y ss.

<sup>119</sup> Denis Noble también se hace el mismo dilema ¿quién es primero la gallina o el huevo? Cuya respuesta es que “coevolucionaron.” Noble, D. (2008) Op. Cit.. Pág. 37.

mundo circundante percibido subjetivamente y el mundo interno, percibido subjetivamente también por el sujeto<sup>120</sup>. Reconociendo la sabiduría de Goethe:

“Si el ojo no fuese propio para el sol,  
El sol nunca podría verse”  
Al que Uexküll le añade:  
“Si el sol no fuese propio para el ojo,  
En ningún cielo podría brillar”<sup>121</sup>

Por eso la interrelación entre el mundo y los sujetos cognoscentes u organismos vivos son correlativos e interdependientes:

“Si no fuese la flor propia para la abeja  
Y la abeja propia para la flor,  
Jamás podría lograrse la armonía.”

Uexküll quiere dejar patente la interdependencia contrapuntística y la multiplicidad de mundos o Umwelten que interconexionan o no entre ellos, dependiendo de las concordancias de los “círculos funcionales” de cada Bauplan o estructura morfológica de cada ser vivo, entre linajes, familias o especies.

“El color de las flores no es, en efecto, el mismo para nosotros [que para las abejas], pero las sirve como un signo perceptivo seguro, porque las flores y las abejas se hallan compuestas formando contrapunto”<sup>122</sup>

Varela expone con claridad que damos por sentado que el color que vemos es un atributo de la longitud de onda de la luz reflejada por los objetos, que nosotros la captamos y la procesamos como información relevante.<sup>123</sup> En rigor, el color percibido de un objeto es en buena medida, independiente de la longitud de onda que percibimos. En cambio, hay un complejo proceso de comparación cooperativa entre múltiple conjuntos neuronales del cerebro, el cual determina el color de un objeto según el estado cerebral global que corresponde tanto a una imagen de la retina como a cierta expectativa de lo que debería de ser dicho objeto. Actualmente muchos científicos de la visión como algunos filósofos argumentan que no solamente la función de la visión del color es la recuperación de la reflectancia de la superficie de los objetos, sino que el color mismo es la reflectancia de la superficie.<sup>124</sup>

Por esto, es importante comprender que el color va ligado al objeto observado y al sujeto que lo observa. Color y percepción de color es huevo-gallina anteriormente citado. Nuestra interrelación externo-interno en la cognición es entonces una “acción

---

<sup>120</sup> Esta distinción es obligada entre el dolor percibido por el sujeto y el síntoma describible por un médico o veterinario.

<sup>121</sup> Uexküll, Jakob von (1942) Op. Cit.. Pág. 133.

<sup>122</sup> Uexküll, Jakob von (1942) Op. Cit.. Pág. 127.

<sup>123</sup> Valera, F. J. (2002) *Conocer*. Op. Cit..Pág.105-106.

<sup>124</sup>Maloney Computational Approaches to Color Constancy.Pág. 119. Para un comentario filosófico véase Hilbert Color and Color Perception y Matthen, “Biological Functions and Perceptual Content”. En: Valera, F. J. (1992) Op. Cit..Pág. 194.

corporeizada”. Dicho giro viene a que la cognición depende de las experiencias originadas en la posesión de un cuerpo con diversas aptitudes sensorio-motrices (*Merkorgan – Wirkorgan*, en la terminología Uexkülliana) y, además, dichas aptitudes sensorio-motrices están encajadas en un contexto biológico, psicológico, cultural y etológico<sup>125</sup>.

Por eso podemos, primero, formular<sup>126</sup> el enfoque enactivo consistente en que la percepción es una “acción guiada perceptivamente” y que “las estructuras cognitivas emergen de los modelos sensorio-motores recurrentes que permiten que la acción sea guiada perceptivamente”. Y segundo, considerar su adecuación cognitiva cuando transforma (un organismo) un mundo de significación preexistente – como todos los vástagos de toda especie – o configura uno nuevo – como ocurre en la historia de la evolución.

En la descripción del Umwelt de Uexküll como “*enacción autopoietica*” enlaza la “acción guiada perceptivamente”, como la dinamización (*Wirkmale*) de la actividad del organismo guiada por las sensaciones (*Merkmale*) en una emergencia de un mundo subjetivo configurado por sí mismo autopoieticamente en “conformidad al plan” genotípico y fenotípico.

Un aspecto muy curioso que deseo exponer está en relación entre los fundamentos bio-filosóficos de la teoría biológica de Uexküll con el concepto de la autopoiesis y las ideas que tanto Humberto Maturana como Francisco Varela trabajaron para el primer desarrollo de su teoría autopoietica de los organismos<sup>127</sup>:

0. “*El problema de la autonomía de lo vivo es central y hay que cernirlo en su forma mínima, en la caracterización de la unidad viviente.*” Dicha afirmación encaja absolutamente con la idea que Uexküll defendió de Hans Driesch sobre “la autonomía de la vida” cuya prueba vital está la introducción del “sistema armónico equipotencial” y la “armonía morfogenética” como fundamentos fisiológicos del concepto biológico de “entelequia” como fuerza holística de cohesión entre la vida y los mecanismos de funcionamiento de los organismos.
1. “*La caracterización de la unidad viva mínima no puede hacerse solamente sobre la base de componentes materiales. La descripción de la organización de lo vivo como configuración o pattern es igualmente esencial*” Esto enlaza perfectamente tanto con el concepto de teleología intrínseca en la autoorganización nacida en el concepto de Kant de *Zweckmäßigkeit*<sup>128</sup> como en la “conformidad a plan” o *Planmäßigkeit* de Uexküll. En la Crítica del Juicio, el dilema “teleo-mecánico” de la antinomia entre el juicio reflexivo y el juicio determinante, Kant apoya al juicio reflexivo para que

---

<sup>125</sup> Este encaje lo introduzco yo como condición de apertura de dicha acción corporeizada para todo animal, fungi e incluso vegetal y bacteriano.

<sup>126</sup> Valera, F. J. (1992) Op. Cit.. Pág. 203.

<sup>127</sup> Valera, F. J., Maturana, H. (1973) *De Máquinas y Seres Vivos*. Opus Cit. Pág. 45.

<sup>128</sup> Weber, A., Valera, F. J. (202) *Life after kant: Natural purposes and the autopoietic foundations of biological individuality. Phenomenology and the Cognitive Sciences*. Vol 1. Pág.997-125. Kluwer Academic Publishers. Netherland. Pág. 105.

admitan que existan explicaciones mecanicistas que en su profundidad pueda establecer causas finales no explicativas reduciblemente bajo esas pautas mecanicistas con las que se inició la investigación. Y para Uexküll, la organización de un ser vivo se realizará bajo lo que denominará “la conformidad a plan”, es decir una determinada disposición mereológica de las diferentes partes de un organismo que hacen de él una unidad<sup>129</sup>. También es coherente al desarrollo de Hans Driesch en concreto de su sentido “teleo-mecanicista” de la “entelequia” Dicha “entelequia” no es una fuerza vital metafísica, sino “la capacidad ‘de llevar un fin en sí’”<sup>130</sup>.

2. *“La organización de lo vivo es, en lo fundamental, un mecanismo de constitución de su identidad como entidad material.”* Jakob von Uexküll no apela a una explicación tanto de la morfogénesis como de la fisiología de los organismos a “factores inmateriales”, sino que comprende los factores mecánicos de la fisiología.<sup>131</sup> Incluso la descripción de los estímulos nerviosos vienen explicados por factores físico-químicos. Para él esto es evidente<sup>132</sup>
3. *“El proceso de constitución de identidad es circular: una red de producciones metabólicas que, entre otras cosas, producen una membrana que hace posible la existencia misma de la red. Esta circularidad fundamental es por lo tanto una autoproducción única de la unidad viviente a nivel celular. El término autopoiesis designa esta organización mínima de lo vivo.”* Hay determinado paralelismo con las “Funtionkreises” o “círculos funcionales” que hemos descrito anteriormente. De hecho son patrones o esquemas de diversos “círculos de retroalimentación”, “biofeedback” y de networking fisiológico de los procesos cognitivos tanto de un invertebrado, como un “quórum sensing” bacteriano incluso en la detección de AMPc en los mixomicetos.
4. *“Toda interacción de la identidad autopoietica ocurre, no sólo en términos de su estructura físico-química, sino también en tanto unidad organizada, esto es, en referencia a su identidad autoproducida. Aparece de manera explícita un punto de referencia en las interacciones y por lo tanto la emergencia de un nuevo nivel de fenómenos: la constitución de significados. Los sistemas autopoieticos inauguran en la naturaleza el fenómeno interpretativo.”* Esto lo hemos descrito en muchos aspectos de los estudios biológicos de Uexküll, primero el equivalente homeomórfico entre la teoría de las “energías específicas” de Johannes Müller y los “Ich-ton” o “tonos del yo” en Uexküll. Dichos “Ich-ton” ofrecen no sólo una identidad tonal de cada célula como “campanillas vivientes”, también configuran un estadio jerárquico superior al modelo físico-químico inerte, una interpretación de una emergencia dada por una causación ascendente. De hecho, concordando con el

---

<sup>129</sup> Uexküll, Jakob von. (1934) Ideas para una concepción biológica del mundo. Espasa-Calpe. Col. Biblioteca de Ideas del Siglo XX. Madrid. Pág.11.

<sup>130</sup> Uexküll, Jakob von. (1934) Ideas para una concepción biológica del mundo. Op. Cit. Pág 28.

<sup>131</sup> Sobretudo en las explicaciones sobre el sistema nervioso en cnidarios (medusas, actinias o anémonas) o en braquiuros (cangrejos de mar, majoideos) y así describir las características de los circuitos nerviosos.

<sup>132</sup> Uexküll, Jakob von. (1934) Ideas para una concepción biológica del mundo. Op. Cit. Pág 32.

tema de la correlación entre mundo – visión que hemos visto antes, Uexküll comenta un detalle que confirma lo antes expuesto: “Como los colores, las energías específicas (los tonos del yo) de las células cerebrales son las que se hallan bajo la influencia del ojo, las que seleccionan las ondas etéreas y las transforman en excitación nerviosa enviada al cerebro; así son también los sonidos de las energías específicas de aquellas células cerebrales que se hayan bajo la influencia del oído y recogen determinadas vibraciones del aire”<sup>133</sup> Dichas “energías específicas” configuran una “paleta de signos de significación”<sup>134</sup> que permite identificar (diversas especies), interpretar (si es enemigo o no) y distinguir (distancias) Todas estas ideas sobre los signos de significación son las bases biosemióticas y biohermenéuticas que están actualmente vigentes.

5. *“La identidad autopoietica hace posible la evolución a través de series reproductivas con variación estructural con conservación de la identidad. La constitución identitaria de un individuo precede, empírica y lógicamente, en el proceso de evolución.”* Para Uexküll la conservación de la identidad promueve una “estasis” en la historia de la evolución, tal como expuse en mi trabajo de investigación anterior con el “equilibrio puntuado” de Gould y Eldredge<sup>135</sup>. La conservación de la identidad en Uexküll viene dado por la adaptación como fin viviente al que aspira, desde luego, toda la producción de organismos o morfogénesis. Fin que no deja de ser un medio para otro fin: la supervivencia ontogénica y filogénica. “Así pues, la serie melódica de los impulsos, que crea las propiedades de los organismos, se hayan bajo el imperio de la adaptación. Pero entonces la adaptación misma no es ya sólo una relación entre cosas tan heterogéneas como el animal y los notificadores –los objetos de significación- sino que es un rasgo activo que con su energía morfogenética hace coincidir el sujeto con su mundo circundante.”<sup>136</sup>

Con estos puntos Varela y Maturana especifican el concepto de autopoiesis a los que complementa tres conceptos que forman parte del núcleo de las consideraciones de las ciencias complejas (desde la biología evolutiva hasta las comunicaciones, como en ciencias cognitivas, IA, y neurología por supuesto).

- La emergencia: Esta propiedad surge de sus componentes base, pero no pueden reducirse a ellos. La vida celular es un caso de estos, lo que le permite su formalización.
- La individuación: Es un proceso que contiene capacidades emergentes o internas (del Innenwelt) que hace que la serie evolutiva no se explique tan solo desde una selección externa, sino que depende de las propiedades intrínsecas de la *autonomía* de los individuos que la constituyen.

<sup>133</sup> Uexküll, Jakob von (1942) Op. Cit.. Pág. 73.

<sup>134</sup> Ibid.. Pág. 78.

<sup>135</sup> Castro, O. (2009) Op. Cit. pp. 192 y ss.

<sup>136</sup> Uexküll, Jakob von (1920) Cartas Biológicas a una Dama. Op. Cit.. Pág 94.

- La interpretación: Fenómeno clave de todos los fenómenos cognitivos naturales, vida social inclusive. Varela dice que la significación surge de la referencia a una identidad bien definida y rechaza la explicación por una captación de información a partir de una exterioridad<sup>137</sup>.

Para poner de relieve lo que significa esencialmente la autonomía Varela (1997) lo expone en dos proposiciones que están relacionadas entre sí.

Proposición 1: Los organismos son fundamentalmente un proceso de constitución de una identidad.

Proposición 2: La identidad emergente del organismo da, lógicamente y de forma mecánica, el punto de referencia para un dominio de las interacciones.

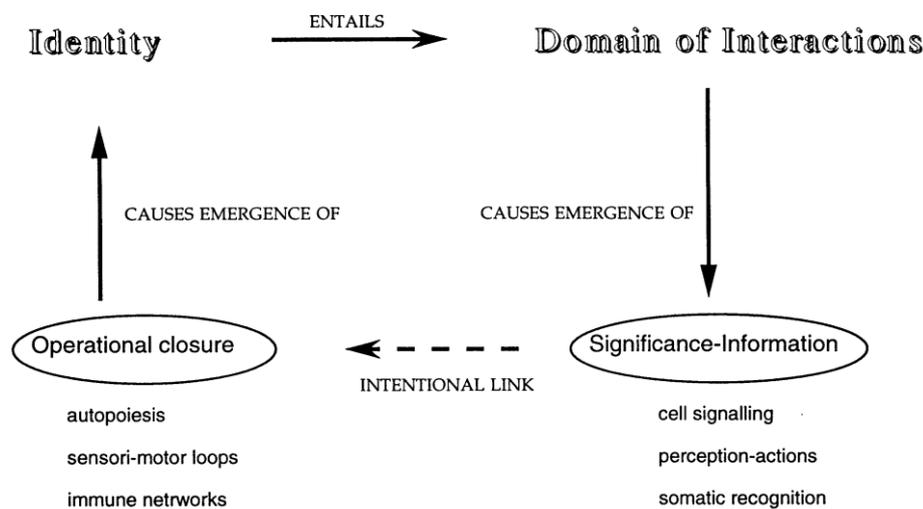


Fig. 3. Los dos conceptos clave interrelacionados para dar cuenta de la autonomía de la vida. Estas dos nociones clave – cómo la identidad se produce y lo que esta identidad permite como generador del dominio de la existencia propia de la vida, expresadas en las Proposiciones 1 y 2 – son complementarias; dos caras de una misma moneda. (Varela 1997).

Por identidad Varela ofrece una calidad unitaria, una coherencia de algún tipo. No se entiende como una descripción estática estructural (se trata de un proceso), ni una extrapolación de connotaciones mentalistas o psicológicas (que es la identidad en un sentido generalizado, no personalista). Otro punto es que la naturaleza de este proceso es siempre una de un cierre operacional (Varela, 1979), es decir, un proceso circular de interconexión reflexiva, cuyo principal efecto es su propia producción. Este es el cierre de las operaciones que da lugar a una coherencia emergente o global, sin la necesidad de un “controlador central”, por lo tanto, la identidad Varela concebía no es localizable substancialmente, y sin embargo, perfectamente capaz de generar interacciones. Una clave esencial aquí es, por supuesto, lo que hemos comprendido acerca de las propiedades emergentes en varios sistemas complejos. Diferentes organismos se diferencian en los tipos de mecanismos múltiples de identidad que tienen, debido a sus caminos evolutivos únicos.

<sup>137</sup> Valera, F. J., Maturana, H. (1973) *De Máquinas y Seres Vivos*. Opus Cit. Pág. 46.

En un dominio de las interacciones, las identidades de vida se producen por algún tipo de cierre, pero lo que se produce es un nivel emergente interactivo. Las interacciones tienen importancia y las consecuencias para la identidad unitaria, aunque mecánicamente todas las interacciones se producen tanto a nivel de componente como a nivel de unidad.

Varela considera que las configuraciones de un nivel de interacción para toda unidad generan una perspectiva desde la cual dicha interacción se hace posible. En otras palabras, aquí reside la fuente de los valores informativos, intencionales o semánticos para todos los organismos vivos. Por lo que implica que los sistemas vivos conllevan algo muy significativo: que los organismos son autónomos, no heterónomos como antes se quería demostrar.

Ezequiel Di Paolo (2010) lo remarca de una forma muy bien definida: “Un sistema autónomo se define como un sistema compuesto por varios procesos que activamente generan y mantienen una identidad en condiciones precarias. Por identidad nos referimos a la propiedad de clausura o cierre operacional. El cierre operacional indica que entre las condiciones propicias para cualquier proceso constituyente en el sistema siempre podemos encontrar otros procesos en el sistema y por el contrario, todos los procesos en el sistema es una condición favorable para algún otro proceso. Un sistema autónomo es auto-distinto, es decir, un proceso / componente, o bien pertenece o no a una red de condiciones favorables. Se afirmando activamente la identidad del sistema por su propio funcionamiento. Por precario nos referimos al hecho de que, en ausencia de la organización como una red de procesos aislados, los procesos componentes podrían tender a reducirse o a extinguirse.”

Pero como veremos más adelante, esto requiere de una normatividad con las interacciones con el Umwelt que genera una causa formal o conformacional del agente auto-mantenido y que es un hilo muy fino de estabilidad estructural de conformación vital.

### **Autopoiesis i cognición<sup>138</sup>**

Uno de los problemas fundamentales que la biología teórica ha querido contrastar con la biología experimental ha sido la propia definición de la vida como proceso, es decir *¿cómo es posible comprender los procesos biológicos desde la experiencia del propio organismo biológico que lo vive?* Esta pregunta ha ofrecido un camino de estudio fenomenológico y constructivista de la biología que con Uexküll estuvo en permanente estudio en su Umweltforschung hasta su desaparición en 1944, y que a partir del estudio de los organismos vivos como sistemas abiertos (von Bertalanffy 1968) ha ido desarrollando la especificidad de lo que Francisco Varela y Humberto Maturana definieron como *autopoiesis*: la propiedad básica de los seres vivos en tanto que son sistemas determinados en su estructura, es decir, son sistemas tales que cuando algo

---

<sup>138</sup> Castro, O. (2011) *La biosemiótica y la biología cognitiva en organismos sin sistema nervioso*. Ludus Vitalis, vol. XIX, num. 36, 2011, pp. 47-84.

externo incide sobre ellos, los efectos dependen de ellos mismos, de su estructura en ese instante, y no de lo externo (Varela y Maturana 1973, 1994; Varela, Maturana y Uribe 1974) . *Auto* significa “sí mismo” y se refiere a la autonomía de los sistemas autoorganizadores. *Poiesis*, es la raíz griega de la palabra “poesía” que significa “creación”. Por lo tanto autopoiesis significa “creación de sí mismo” (Capra 1996).

Se ha corroborado que la autopoiesis tiene su descripción química (Luisi y Varela 1989) también en orgánulos y micelas (una fase coloidal de conglomerados moleculares tensioactivos, como el ácido oleico) en las que, cuando aparece una equivalencia cuantitativa de reacciones de generación y de destrucción (en sus velocidades) se produce un equilibrio homeostático. Dicho equilibrio homeodinámico<sup>139</sup> no modifica la unidad y permite describir de esta forma una autopoiesis. Pero esto no significa que la micela, o una vesícula pueda ser un organismo vivo. Aparentemente la actividad de una vesícula de oleato no es tan diferente que una ameba que absorbe nutriente y excreta un subproducto ¿dónde reside la diferencia? ¿Todos los sistemas autopoieticos están vivos? En realidad no es tautológica la relación entre sistema autopoietico y sistema vivo. Es decir, todos los sistemas vivos son sistemas autopoieticos, pero no todos los sistemas autopoieticos son sistemas vivos. Ahora bien, ¿todos los sistemas vivos tienen cognición?

Maturana lo deja claro:

*“Los sistemas vivos son sistemas cognitivos y el proceso de vivir es un proceso de cognición. Esta afirmación es válida para todos los organismos, tengan o no sistema nervioso”* (Maturana 1970; Maturana y Varela 1980; Capra 1996).

La afirmación de Maturana establece la condición de co-emergencia entre la autopoiesis en los organismos vivos y la percepción del medio circundante como un proceso cognitivo que identifica con los procesos autopoieticos en los organismos biológicos, tanto en los seres unicelulares como pluricelulares. Es la misma condición que la cuestión anteriormente expuesta de Varela sobre la gallina o el huevo.

A esta afirmación, conocida como “teoría de Santiago” (Capra 1996) se le debe añadir un segundo punto referente a los procesos cognitivos:

*“Si un sistema vivo entra en una interacción cognitiva, su estado interno se cambia de una manera relevante para su mantenimiento, y éste entra en una nueva interacción, sin pérdida de su identidad. En un organismo sin un sistema nervioso (o su equivalente funcional) sus interacciones son de naturaleza química o física (una molécula es absorbida y se inició un proceso enzimático, o un fotón es capturado y se lleva a cabo un paso en la fotosíntesis). Para tal*

---

<sup>139</sup>La homeostasis, homeorhesis y homeogenesis están considerados como ejemplos de morfostasis, a diferencia de lo que se define aquí como morfogénesis. En morfostasis o hay mantenimiento de la estructura, o la elaboración de estructuras 'programados', o la sustitución de una estructura por una estructura homóloga. (Estas definiciones pueden diferir del uso aceptado de algunos de estos términos en algunas disciplinas. Cf. Thorn, 1968: 152.) Anthony Wilden (1980) *System and structure. Essays in Communication and Exchange*. 2nd Edition -Tavistock , p. 355.

*organismo las relaciones sostenidas entre los eventos físicos quedan fuera de su dominio de interacciones”*.<sup>140</sup>

Por lo tanto podemos afirmar que existen procesos cognitivos sin necesidad de sistema nervioso y que, aunque las interacciones sean de naturaleza físico-química, *su proceso cognitivo está fuera de dicho dominio*, más bien sostiene una relación significativa para los procesos autopoiéticos que intervienen en los sistemas vivos<sup>141</sup>.

Por lo tanto para que hablemos de seres vivos, necesitamos entonces identificar los procesos autopoiéticos determinados que permitan la autoorganización, el automantenimiento, la autonomía, la autorreplicación, el metabolismo y una evolución abierta – cerrada<sup>142</sup> con procesos cognitivos que permitan la acción e interacción con el entorno (Umwelt), de acuerdo con la identificación de los signos de percepción transducidos en señales decodificables por el propio organismo. Es por eso que podemos hablar de la autopoiesis y la cognición como procesos biosemióticos. Tal como lo dice Andreas Weber:

“La escuela de Varela subraya que el mundo exterior actúa como una mera ‘patada’ que motiva al sistema a establecer un nuevo equilibrio caracterizado sólo por las necesidades de automantenimiento. Para un enfoque biosemiótico esto significa dejar de preocuparse por las constricciones del problema mente-cuerpo. La circularidad material de la autopoiesis deja obsoleto el dualismo. En un sistema autorreferencial, el significado es el ‘lado interior’ del aspecto material de la clausura del sistema” (Weber 2001).

Hablar de la liberación del dualismo mente-cuerpo para organismos vivos sin sistema nervioso parece que esté fuera de su contexto. Pero tal como la enuncia la “teoría de Santiago” las relaciones sostenidas entre los eventos físicos quedan fuera del dominio de interacciones del organismo por “puras relaciones” (Maturana 1970)

Ya hemos visto que para Varela los seres cognitivos no representan un mundo pre-dado, y la cognición consiste más bien en “enacción” (Varela 1997), entendiendo por esta la puesta en marcha de un “mundo” que surge a partir de un cúmulo de acciones varias – tanto autoinductivas como reactivas – que un ser vivo realiza en el “mundo”.

---

<sup>140</sup> Maturana, H. R. (1970) *Biology of Cognition*. Reimpreso en Maturana, H. R., Varela, F. J. (1980) *Autopoiesis: The Organization of the Living*. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland. pp. 13. Las cursivas son mías.

<sup>141</sup> Maturana afirma que “los fenómenos propios de la dinámica estructural de un ser vivo y los fenómenos propios de su realización e interacción con el entorno en el que se realiza, son fenómenos de distinta clase y no pueden ser reducidos unos a otros” (Maturana, H. R. (1995) *Origen de las especies por medio de la deriva natural, o La diversificación de los linajes a través de la conservación y cambio de los fenotipos ontogénicos*. En “La Realidad: ¿Objetiva o Construida?”. Editorial Anthropos, tomo I, Barcelona, pp. 109.

<sup>142</sup> Abierta como sistema de intercambio termodinámico y sensitivo, y cerrada como un sistema topológico consistente morfológicamente y homeostático fisiológicamente.

Entonces la enacción es posible gracias a la “clausura operacional”<sup>143</sup> del sistema, es decir de sus propiedades autoorganizativas y la forma en que el sistema se acopla con el medio. Los sistemas enactúan un mundo sobre la base de su autonomía, o dicho de otra forma, el mundo “es enactuado” a través de una historia de acoplamiento estructural. La clausura y el acoplamiento hacen emerger un mundo que resulta relevante – y por lo tanto significativo - para un sistema biológico cualquiera, incluso si son plantas, bacterias, hongos mucilaginosos, o cualquier protista.

La organización es entonces una invariante de la dinámica de todos los sistemas biológicos, es decir, “es el complejo unitario de relaciones que constituye la unidad de lo viviente” como lo determina Pier Luigi Luisi (2006). Por lo que acogemos su redefinición de autopoiesis, en tanto que es “un sistema de organización (definido como unidad) en red de procesos de transformación y de destrucción de componentes, en los que a través de sus interacciones y transformaciones, se regeneran permanentemente y se forjan redes de procesos, constituyendo de ese modo una unidad topológica concreta definida por una frontera y relacionado a través de un acoplamiento adaptativo o cognitivo” (Luisi 2010).

En resumen, hemos visto que el significado de Umwelt puede tomar el sentido de enacción en tanto que representación o performance del organismo, y a su vez como “emergencia” de un mundo significativo e interdependiente, a partir de un trasfondo de comunicación en “clausura operacional”. Pero también el Umwelt es autopoietico puesto que dicha emergencia superviene de una red de “círculos funcionales” cognitivos y de retroalimentación en “conformidad a un plan” genético que permite mantener estos círculos invariables tanto ontogénica como filogenéticamente. Por lo que el concepto de Umwelt de Uexküll enriquece su significado, siendo *un fundamento cognitivo de un organismo* y que he definido como “enacción autopoietica” a la “acción guiada perceptivamente” surgida de una causación ascendente.

Por otra parte, he destacado que los organismos sin sistema nervioso tienen, o mejor dicho supervienen cognición de sus circuitos funcionales, en concordancia con la “teoría de Santiago” de Maturana. El núcleo de nuestro desarrollo en la tesis respecto a la cognición en organismos sin sistema nervioso recae en la apuesta investigadora por encontrar aquellos factores identificadores significativos y autopoieticos que manifiestan dichos organismos y que no requieren de una naturaleza nerviosa para que existan circuitos funcionales que operen como tales nervios; es decir, que dichos circuitos funcionales sean una equivalencia funcional y homeomórfica al sistema nervioso.

Esto describe nuestro viaje hacia la condición de posibilidad de una emergencia de unos principios mínimos cognitivos desarrollados en organismos sin sistema nervioso.

---

<sup>143</sup> En principio, la autopoiesis describe la absoluta “clausura organizacional” del sistema. Todo fenómeno sólo puede ser descrito dentro de esa delimitación-definición del sistema; o ni siquiera podrá ser descrito. Pero en esa clausura operacional, el sistema sigue abierto estructuralmente al entorno en cuanto que sus mecanismos o sensores permiten traducir impulsos externos a eventos internos (la “irritación”, p. ej., producida en los receptores biológicos “informa” a la célula sobre eventuales cambios).

### **Capítulo 3. En búsqueda de la cognición en la biología: Toma de sentido de subsistemas autopoiéticos.**

#### **Proto-cognición y coherencia en agentes proto-celulares e intra-celulares**

En este apartado vamos a estudiar cómo las actividades funcionales de procesos autoorganizados no sólo se encuentran en los organismos vivos mínimos o unicelulares. La composición de las cadenas metabólicas - incluso las denominadas proto-metabólicas para experimentos con proto-células o con vesículas lípidas, como las descritas por Kepa Ruiz-Mirazo y Fabio Mavelli (2008) – pueden satisfacer elementos funcionales que son condiciones propias de procesos que podríamos denominar cognitivos, en la osadía que estamos teniendo para el usufructo de dicha condición. No se trata de fomentar un concepto tan rigurosamente axial como la cognición a la ligera. Todo lo contrario, ante la gran laxitud en el usufructo de un calificativo clave para la comprensión de algunas descripciones funcionales emergentes que *dependen de una superveniencia funcional para su interrelación básica de existencia*, nos vemos comprometidos en facilitar por un lado ejemplos de algunas manifestaciones funcionales que admiten la descripción de componentes necesarios para la aceptación de procesos cognitivos – o si se prefiere proto-cognitivas, en la mayoría de los casos – en niveles muy elementales de la biología (como en biofísica y en bioquímica). También queremos destacar que tanto en sistemas denominados proto-celulares como en los compartimientos celulares (Weng, Bhalla y Iyengar 1999) podemos hablar de sistemas autónomos que se automantienen y que, en tanto que son autopoiéticos, sus condiciones de generar caminos de desarrollo y de organización coherentes (Fisher, Paton y Matsuno 1999) permiten primero ser descritos como agentes. Esta descripción es posible gracias a la interacción con su entorno exterior son capaces de decodificar las señales que provienen de este y discriminar (obteniendo significación de la señal o cascadas de ellas) intercambiando elementos bioquímicos bajo un balanceo termodinámico de equilibrios entrópicos para su propio automantenimiento, y evitando la degradación que provoca las alteraciones asimétricas del entorno (Hoffmeyer 1998, Kauffman 2000). Esta descripción de agente autónomo nos invita a un discurso epistemológico, sino nuevo, podríamos decir paradigmáticamente apostable, de actividades que podríamos describir como proto-cognitivas. Pero antes de aventurarnos si esta descripción son plausibles, necesitamos separar conceptos que por cierta simbiosis explicativa de la comunidad científica, usan términos que no son equivalentes aunque lo parezcan. Denominaciones como adaptabilidad, adecuación, cognitivo, inteligente (tanto en su concepción anglosajona como “smart” o como “intelligence”) son puestos en juicio entre diferentes sectores de la biología como de las ciencias cognitivas, en la IA o en la LA, en biosemiótica, etc. Lo que se pretende aquí no es tanto juzgar su uso indebido sino defender su correcto uso en los campos que son pertinentes para la descripción que haré en la segunda parte de este trabajo, cuando aplique toda esta tesis al estudio concreto de ciertos comportamientos de mixomicetos.

Por esta razón vamos a mostrar actividades tanto bioquímicas como biofísicas que pueden jugar un papel fundamentador en los correlatos funcionales de la cognición. Mientras vamos desarrollando dichas actividades se van a ir desplegando denominaciones relacionadas a la cognición en las que en ciertos apartados iremos esclareciendo, para al final poder generar un corpus significativo y en cierto modo diferenciador de las mismas.

### **Subsistemas autopoieticos**

Para poder explicar los dominios mínimos de actividad perceptiva en una organización autopoietica estable estructuralmente (sea por factores morfológicos, sean por factores metabólicos, ciclos, u otras posibilidades de clausula operacional de autonomía biológica) debemos establecer un nuevo criterio de autonomía interdependiente, dentro de una jerarquización en la organización de los seres vivos. Estos normalmente se establecen desde las células, como unidad básica de vida, hacia sistemas más complejos autoorganizados como órganos de sistemas más complejos, así hasta un organismo pluricelular, llegando incluso a organizaciones tipo colonias o enjambres. Pero también estas jerarquías de organización estable se pueden establecer dentro de la célula, hacia sus componentes celulares donde podemos encontrar factores de estabilidad estructural autopoietica asimétrica entre el entorno y el componente (por ejemplo un microtúbulo, o una mitocondria y el entorno citoplasmático). Queremos poner en consideración que cada compartimento celular puede considerarse como un sistema de autopoiesis inferior en un nivel jerárquico de autopoietico superior como es la célula en este caso. Estaríamos hablando de componentes celulares como subsistemas autopoieticos interdependientes en un nivel jerárquico inferior a la célula.

Dichos subsistemas comprenden una enactividad de menor complejidad emergente, pero de una clara complejidad “subveniente”<sup>144</sup>. Es decir, que los factores físico-químicos encargados de la estabilidad del subsistema autopoietico conjuga una multiplicidad de actividades interactuantes que deben de funcionar como un reloj genético, de acoplamientos interactivos. Más dicho mecanismo constituye una identidad emergente diferenciada genéticamente con una función o funciones determinadas para el sistema autopoietico superior. Este factor generador de funciones determinadas genéticamente es el que considero con Timothy Lenoir de “teleomecanicista”. Mas este teleomecaniscismo “genético” si se me permite, aunque haya tenido un factor neutral y aleatorio su desarrollo evolutivo, lo que es cierto es que conjuga una significación de automantenimiento referenciada de la unidad organizada en su ciclo vital. Es decir, mientras mantenga la estabilidad estructural tanto morfológica como funcional en el sistema autopoietico superior se recurrirá a su regulación y regeneración por reconocimiento agencial (me aventuraría a pensar este reconocimiento como

---

<sup>144</sup> En una relación de superveniencia donde el conjunto A superviene sobre el conjunto B, las propiedades del conjunto A se dice que son las propiedades supervenientes, mientras que las propiedades del conjunto B se dice que son las propiedades subvenientes. Más adente estudiaremos más su condición para una posible causalidad ascendente de procesos morfológicos y fisiológicos que permiten los principios mínimos cognitivos.

“estequiométrico” siguiendo el modelo de protocélula denominada *chemoton* del profesor Tibor Gánti (2002, 2003, 2003)<sup>145</sup>). Cuando este falla, los subsistemas autopoieticos que regulan la estabilidad del sistema autopoietico superior se ponen en funcionamiento para la reparación o la sustitución del componente celular fallido, balanceando estequiométricamente su proceso<sup>146</sup>. Dicho factor reparador no deja de ser una actividad programada, pero requiere de un detector que interprete las deficiencias biofísicas o bioquímicas que están en juego; esto es lo que me refería a a significación de automantenimiento. Es importante tener siempre en cuenta que las constricciones generadas por los equilibrios homeodinámicos del medio circundante del organismo establecen los límites del equilibrio estequiometrico que fundamenta la regulación. La maquinaria molecular específica no está más allá del trabajo o por encima de la red constitutiva (Bich, Mossio, Ruiz-Mirazo y Moreno 2015).

Para poder estudiar estas claves de interpretación de las señales, tanto en su fallida como en su buen funcionamiento, ha de haber una actividad de transducción, de traducción e interpretación de las señales bioquímicas (cascadas moleculares) y de los signos biofísicos de estabilidad o inestabilidad (irritabilidad haptica, flexibilidad alterada, etc.)<sup>147</sup>. Estos procesos de interpretación – tanto biofísicos como bioquímicos – del entorno inmediato forma parte de los procesos de percepción que los subsistemas autopoieticos deben de establecer. Y son objeto de estudio para la comprensión de las conductas adaptativas de los organismos en tanto que “sintientes” como denomina Terrence Deacon (2012).

---

<sup>145</sup> Por medio de la teoría de los fluidos autómatas, se pueden diseñar sistemas químicos de diferentes mecanismos y propiedades generadoras de periodicidad. Es de suponer, que forman una parte de la base química de la periodicidad biológica. Para conocer mejor el sistema estequiométrico y el concepto de Chemoton – estudio que excede los objetivos de este trabajo, pero que recomiendo – leer Gánti, T (2002) *On the early evolutionary origin of biological periodicity*. Cell Biology International, Vol. 26, No. 8, 729-735., y sobretodo Gánti, (2003) *The Principles of Life*. Oxford University Press., Gánti, T. (2003) *Chemoton Theory*. Vol. 1.Theoretical Foundation of Fluid Machineries y Vol. 2.Theory of Living Systems.Kluwer Academic/Plenum Publishers.

<sup>146</sup> El modelo estequiométrico de Gánti propone, entre otras cosas, reproducir entidades las cuales forman genealogías de "superposición de materiales" de las partes - lo que una vez fueron parte de los padres se vuelven parte de la descendencia. Si bien las relaciones entre padres e hijos pueden ser entendidas en términos de copia-similitud, el proceso de reproducción es fundamentalmente diferente de los procesos de copia. Los ciclos autocatalíticos descritos en el mínimo sistema de vida descrito como “Chemoton” (modelo abstracto de la unidad fundamental de vida que crece metabólicamente) juntamente con el ciclo metabólico y la membrana lipídica de doble capa crea la triada Peirceana de autoregulación y automantenimiento producido por ciclos estequiométricos. Es perfectamente traducible a los modelos de ciclos funcionales (Funktionkreises) de Uexküll, como también de forma transitiva, a los de “hiperciclo” de Eigen y Schuster.

<sup>147</sup> Algunos ejemplos que pueden responder a una actividad perceptora de límites o umbrales biofísico-químicos integrados son las capacidades regulatorias las proporciona Bich (2012), que describe tres tipos de capacidades regulatorias: Una de ellas - y la que nos sirve de ejemplo - alcanza “la capacidad por el subsistema de plantilla para activar la producción de la membrana después de un cierto umbral de concentración en el producto del subsistema metabólico. El papel regulador en el sistema consistiría en responder al incremento de la presión interna mediante la ampliación de la membrana con el fin de evitar la explosión. De acuerdo con la clasificación propuesta, este ejemplo pertenece a la primera clase de mecanismo (estabilidad), basado en la amortiguación de las perturbaciones estrictamente estructurales: en este caso la amortiguación toma la forma de umbral de activación”.

## “Sintiencia”<sup>148</sup>

Uno de los puntos sensibles de nuestro trabajo reside en la capacidad de los organismos simples, o como los prefiero denominar los “organismos elementales”, como seres capaces de sentir y de procesar información tanto del entorno como de su mundo interno (Umwelt e Innenwelt). Este proceso de sentir es inherente tanto a los fenómenos bioquímicos que transfieren en su composición gradientes quimiotácticos del entorno y de su interior como de los fenómenos biofísicos que permiten la estabilidad estructural y su morfodinámica. La capacidad de reaccionar ante los flujos quimiotácticos depende de los receptores y de los órganos que contribuyen tanto a la acumulación como de la generación. Toda una cadena de procesos enrobustecidos agencialmente de forma autopoiética. Así mismo pasa con los procesos biofísicos de ensamblaje molecular para la formación de filamentos o de membranas que permiten la estabilidad morfológica y estructural. Se estudian por separado para concretar sus actividades y así poder ver como reaccionan ante agentes que pueden desestabilizar la célula o el organismo elemental via bioquímica o biofísica. Pero se ha de comprender que la realidad biológica, aunque la estudiemos sobre líneas bioquímicas, o biofísicas o en sistemas complejos, todas estas líneas son epistemológicas o de método científico. No sabemos aún obtener una visión científica de la realidad biológica holística que no dependa únicamente de la naturaleza del observador, sino también de la naturaleza de lo observado. La interdependencia entre observador y observado nos lleva a un discurso fenomenológico de la vida de los organismos elementales que nos aleja por desgracia del paradigma de la biología actual. Falta tanto instrumentos de observación fenomenológica top down que permita analizar con precisión la vivencia del organismo elemental y de la agencia con el rigor que una resonancia magnética funcional o un PET nos permite ver lo que le ocurre tanto sanguíneamente como termodinámicamente en el interior de un cerebro que está en una recepción de sensibilidad determinada. No hay fMRI ni PETs para protistas, bacterias, amebas o paramecios, y por lo tanto sólo podemos trabajar con marcadores muy limitados que nos permita determinar cierta circulación bioquímica de cascadas de señales en momentos claves de determinación de alimentarse o de moverse.

Pero esos marcadores no hacen una lectura sintiente del organismo elemental. No nos permite medir la capacidad de resistencia a un agente tóxico, o a un entorno hostil térmico o de acidez, etc. Necesitamos medir más allá de lo que Bateson denominaba el umbral de percepción del experimentador<sup>149</sup>. Ante dicho umbral la ciencia no puede probar y, por lo tanto no puede explicar.

---

<sup>148</sup> En mi trabajo quiero mantener la diferencia entre el concepto de “sintiente” de la “sensitividad”, tal como ha sido traducido al castellano de Ambrosio García Leal en Tusquets Editores el libro de Terrence Deacon “Naturaleza Incompleta. Cómo la Mente Emerge de la Materia”. Tusquets Editores, Col. Metatemáticas Nº 127. Barcelona 2013. De hecho en la versión original Deacon, T. W. (2012) *Incomplete Nature: How Mind Emerged from Matter*. 1st ed.; Norton: New York, NY, USA. Deacon no habla de “sensitivity”. La traducción que mantengo es el de “sintiencia” y de organismo “sintiente”.

<sup>149</sup> Bateson, G. (1979) *Estirpito y Naturaleza*. Amorrortu Ediciones, 2006 Buenos Aires. p. 40.

Ir más allá del umbral de percepción del experimentador no es tan sólo desarrollar nueva instrumentalización perceptiva o de medida, como un microscopio detector de actividades autoinductivas. De hecho, el trabajo de Chalmers<sup>150</sup> sobre los denominados “zombies” en contra de los humanos con consciencia fenoménica, es el límite de la ciencia para la descripción de una consciencia fenomenológicamente experimentable. Un zombi filosófico o p-zombie en la filosofía de la mente y de la percepción es un ser hipotético que es indistinguible de un ser humano normal, excepto en que carece de la experiencia consciente, qualia, o la capacidad de sentir<sup>151</sup>. Por ejemplo, un zombi filosófico podría ser pinchado con un objeto punzante, y no sentir ninguna sensación de dolor, pero sin embargo, se comportan exactamente igual que si dicho pinchazo lo sintiera (puede decir “ay” y ejecutar un retroceso de los estímulos, o nos pueden contar que se trata de un dolor intenso).

Independientemente de la disputa de la conceptibilidad del sujeto zombie, filosóficamente hablando – de una riqueza impresionante para mi gusto – es posible concebir un organismo zombie (podemos generalizarlo si se quiere como “b-zombie”) en tanto que los biólogos experimentales pueden permitirse la licencia de trabajar con ellos sin tener el más mínimo escrúpulo, pues no tienen que pensar en la sintiencia de los propios organismos pues es como si se les hubiera extirpado el sentido del dolor, del hambre, del placer, etc. Y puesto que los organismos biológicos no humanos, con o sin sistema nervioso no confieren emociones ni sensibilidades, ya que no tienen un psiquismo humano<sup>152</sup> podemos permitirnos toda clase de manipulaciones in vivo puesto que son máquinas “b-zombies”. Biológicamente hablando es un debate filosófico sobre la capacidad sintiente o no de los organismos en tanto que son piezas de un reloj complejo, pero reloj al fin y al cabo, ¿o son componentes de seres vivos y en tanto que componente, son también vivos?

Podremos establecer si se quiere una jerarquía de especies que, siendo cercanas a los homínidos, o a los seres complejos como delfines, o mamíferos en general, pueden ofrecer respuestas psíquicas más próximas a las de los seres humanos<sup>153</sup>. Pero el caso es que si la biología experimental trabaja con seres vivos, en tanto que vivos e

---

<sup>150</sup> Chalmers, D. (1996) *La mente consciente*. Editorial Gedisa, 1999 Barcelona. p. 133.

<sup>151</sup> Kirk, Robert. “Zombies”. The Stanford Encyclopedia of Philosophy (edición verano 2009), Edward N. Zalta (ed.).

<sup>152</sup> Sobre el especificismo y la manipulación experimental de los seres vivos para el progreso científico hay múltiples artículos que exponen sus posturas frente al derecho de los animales y otras especies de organismos sintientes. Nuestro objetivo es apoyar el criterio de organismo vivo como entidad sintiente, con o sin sistema nervioso.

<sup>153</sup> No vamos a entrar en este trabajo sobre el debate de la ética en los animales, ni pretendemos dar criterio al respecto. Podemos recomendar la línea de Peter Singer en *Animal Liberation: A New Ethics for our Treatment of Animals*, New York Review/Random House, New York, 1975. En todo caso no involucramos nuestra investigación en ello, sino que proponemos una descripción utilitarista del ser vivo en biología experimental que siendo lícita, implica un cuestionamiento sobre nuestra percepción de zombies biológicos en nuestra explicación metodológica de experimentación y de las premisas científicas de desarrollo. Mi conclusión es que no se ha llegado en absoluto a concebir los seres vivos como sinientes en su totalidad y en la magnitud de su desarrollo biológico, tengan o no sistema nervioso. Algo que queda incluso reducido al absurdo es que los protistas sientan. Es aquí donde mi trabajo tiene defensa biosemiótica para argumentar dicha sintiencia y, como expongo desde el comienzo, una conducta adaptativa inteligente que aproxima y enfoca a un criterio cognitivo mínimo.

independientemente de su especie, son concebidos como máquinas biológicas de extrema complejidad autoorganizativa. Un agente natural o biológico forma parte de una expresión de los estudios de conducta adaptativa, cuyos simuladores agenciales en IA, realizan (o se pretende que realicen) acciones de automantenimiento y/o autopoieticas sin contemplar de momento la sintiencia del agente natural, y no solamente la mecanosensibilidad de los procesos sensibles.

Nuestro objetivo es apoyar el criterio de organismo vivo como entidad sintiente, tenga o no sistema nervioso. La tesis de este trabajo pretende la afirmación y la posible confirmación que todo organismo sin sistema nervioso desarrolla una red de mecanosensibilidades que le permite tomar decisiones teleodinámicas (siguiendo la terminología de Terrence William Deacon<sup>154</sup>) en tanto que dichas tomas de decisiones forma parte de la causa eficiente de la supervivencia del sujeto sintiente como condición de un proceso mínimo cognitivo que le permite, por ejemplo el automantenimiento y/o la autopoiesis.

Se trata de mejorar las claves informativas de las experimentaciones bajo un enfoque teórico nuevo o en una clave semiótica diferente. Esto es así en tanto que vemos la correlación entre los experimentos sobre la sensibilidad y su correspondiente actuación sobre el entorno, al igual que una nueva conducta adaptativa emergida del aprendizaje. Es innegable dichas situaciones si sometemos al agente experimentado a situaciones no habituales, y por lo tanto no decodificado ni genéticamente ni epigenéticamente. Por ejemplo la intervención de un anestésico que no ha registrado nunca una especie de organismo elemental. Más adelante nos adentraremos en las condiciones experimentadas por determinadas clases de mixomicetos con ciertos anestésicos y comprobaremos la oportunidad no trabajada en su momento sobre la condición de posibilidad de establecer la condición de organismo “sintiente” en un protista y lo que repercute dicha afirmación a su estatus ontológico en una biología cognitiva.

Empero, nuestra opción por la afirmación de que todos los organismos vivos son seres sintientes en tanto que toda organización, desde las más primitiva y más sencilla a la más compleja, es un agente sintiente que percibe los factores del entorno que generan diferencias – y por tanto información – recibidas por órganos sensorios (sintencias) y siendo decodificados permiten generar procesos de automantenimiento y de autoregulación. ¿Podríamos entonces decir que un organismo sin sistema nervioso puede sentir? Es decir, ¿puede generar una experiencia interna de perceptividad bio-físico-química entrelazada con el Umwelt decodificado? ¿O esa experiencia interna es un

---

<sup>154</sup> Deacon define la teleodinámica como una forma de organización dinámica que exhibe rasgos de finalidad y de organización por la consecuencia, constituida por la co-creación, la ligadura complementaria y la sinérgia recíproca de dos o más procesos morfodinámicos acoplados. Deacon, T. (2012) *Incomplete Nature: How Mind Emerged from Matter*. 1st ed.; Norton: New York, NY, USA. En español *Naturaleza Incompleta. Cómo la Mente Emerge de la Materia*. Tusquets Editores, Col. Metatemas Nº 127. Barcelona 2013. pp. 562. Podemos entenderla también como la transición entre o desde la termodinámica a la morfodinámica. Una transición emergente adicional producido al ser dinámicamente superveniente de la morfodinámica y, por lo tanto, también de la termodinámica.

efecto “b-zombie” para la biología experimental, totalmente descartable por no contar con los propósitos de investigación de la biología actual?

Considero que al igual que hay una incompletitud en la naturaleza que Deacon entiende como procesos entencionales, también hay una incompletitud epistemológica que invita a que exista una ausencia investigadora en la vida interna de los agentes sintientes. Deacon define un fenómeno *entencional* como intrínsecamente incompleto en el sentido de estar en relación con, constituidos por, u organizados para conseguir algo intrínseco<sup>155</sup>. Pueden estar relacionados estos fenómenos con procesos biológicos, los cuales se han descrito en la literatura científica exentos de propiedades mentales como función, información, recepción, regulación y adaptación. Pero también pueden ofrecerse en procesos cognitivos y semióticos, serán descritos como teleológicos, propósitos, sentido, intención, interpretación y sensación. En general tanto uno como otros són fenómenos entencionales. En mi desarrollo sobre la posibilidad de principios mínimos cognitivos en organismos sin sistema nervioso entiendo la conciliación de los dos tipos de propiedades *entencionales* (vitales y cognitivas) como procesos autoinductivos y automotrices, donde la sentiencia no es considerada como un reflejo de las recepciones informativas del Umwelt decodificable, sino como una actividad autopoiética cuya causa formal generada de causas eficientes no es insoluble de la causa final de su supervivencia. Sintetizándolo more Spinoza, la *persistencia* de ser no deja de ser una *persistencia de funcionar*, y por tanto, de vivir.

### **Sobre las cuatro causas en la biología actual**

La incompletitud epistemológica es evidente en cuanto nuestra mirada busca una explicación científica consistente y robusta. Es cierto que ambas condiciones son metalógicamente necesarias, si es que Gödel no falla<sup>156</sup>. Pero ante un crecimiento asintótico de ambos sentidos de la lógica científica en la biología, se puede observar un mayor enfoque a la robustez explicativa experimental que a la consistencia teórica. De hecho, la biología teórica no dejará de ser un andamio para el trabajo experimentador. Pero el objeto de trabajo cambia cuando se percibe desde marcos de perspectiva diferentes. Algunos de esos marcos, como es el caso de la biosemiótica es relativamente nuevo, pero ofrece una riqueza explicativa de sentido a procesos biológicos que no generan reflexión transdisciplinar si el observador no se separa de las fases físico-químicas para preparar las observaciones desde la los signos y las señales que ofrecen información de categoría más compleja. Esto no quiere decir que debemos de tener en cuenta la perspectiva reduccionista, sino que la integra en una complejidad emergente evitando de este modo cierta ingenuidad explicativa.

Si estudiamos los procesos biofísicos y bioquímicos que fundamentan una emergencia de procesos proto-cognitivos tenemos la necesidad de entender lo que subyace en los cambios tanto en la homeodinámica como en la morfología de los organismos protistas.

---

<sup>155</sup>Deacon (2013) Opus cit. p. 39.

<sup>156</sup>Una teoría consistente no contiene contradicciones, es decir, no es posible demostrar a la vez una fórmula y su contraria.

Sea en las condiciones termodinámicas como en la dinámica de las estabilidades estructurales de los espacios geométricos que encierran las agencias, tanto los cambios ortogrados como los contragrados<sup>157</sup>.

#### (I) la causalidad eficiente<sup>158</sup>

Es una relación de causa-efecto en el tiempo que implica un intercambio interaccional de la energía correspondiente a las entidades de un determinado nivel. Es el resultado de una secuencia temporal de los estados que son causalmente relacionados entre sí. En el lenguaje cotidiano a menudo se describe en términos como “implica”, “efectos”, “implica”, “causas”, “inflige”, “lograr”, etc.

#### (II) la causalidad material

Se refiere a las propiedades inmanentes a las entidades de un determinado nivel (que pueden a su vez estar compuesto por las entidades de un nivel inferior). Causalidad material es a menudo descrito por conceptos tales como “que consiste en”, “hecho”, etc<sup>159</sup>.

#### (III) la causalidad formal

Se refiere a la forma de una entidad o proceso de la medida que no se reduce a la causalidad eficaz o material dado. A menudo es descrito por conceptos como “la estructura de”, “organiza”, etc.

#### (IV) la causalidad funcional

Se refiere a la función desempeñada por una parte dentro de un conjunto procesual integrado, o el propósito de un comportamiento visto desde la perspectiva de la oportunidad de un sistema de estable restante (o ‘sobrevivir’) con el tiempo. Términos tales como “gobernar”, “control”, “regular”, “papel” y, por supuesto, “funciones” se aplican aquí.

En este caso Clauss Emmeche y sus colegas modifican la nomenclatura aristotélica de “causa final”, por la de “causa funcional”, en tanto que las explicaciones teleológicas – como las teleonómicas – basadas en funciones biológicas son científicamente respetadas, de acuerdo con las teorías etiológicas de Karen Neander (1991) en consonancia con Larry Wright (1973, 1976).

---

<sup>157</sup> Cambio ortogrado es la tendencia espontánea “natural” a cambiar sin ninguna interferencia externa. Independientemente de lo que ocurra fuera de un espacio geométrico dado, el cambio puede ofrecerse. Mientras que en contragrado no ocurre en ausencia de intervención impuesto extrínsecamente sobre un sistema que no tiende a cambiar en esa dirección de manera espontánea. En Deacon (2013) **Opus cit.**

<sup>158</sup> Emmeche, C., Køppe, S., Stjernfelt, F.(2000) *Levels, emergence, and three versions of downward causation*. En: Peter Bøgh Andersen, Claus Emmeche, Niels Ole Finnemann and Peder Voetmann Christiansen, eds. (2000): *Downward Causation. Minds, Bodies and Matter*. Århus: Aarhus University Press. p. 31.

<sup>159</sup> En función de la entidad y el marco de la descripción específica, las propiedades pueden incluir la energía potencial, o estados de energía específicas de partículas, intensidad de campo, etc.

Podemos entonces aseverar de forma falsable que existen condiciones casuales que permiten la descripción de conductas adaptativas en determinadas ejecuciones o desarrollos a niveles bioquímicos, y que pueden ser consideradas como componentes o facultades constituyentes de una proto-cognición. Dicha proto-cognición define unas categorías iniciales de constitución del llamado proceso cognitivo y que se sitúa en los orgánulos celulares, incluso también en las estabildades estructurales morfológicas a un nivel bioquímico.

Comparto con Godfrey Smith (2002a) que la idea de que las explicaciones funcionales son intentos de describir, de forma abreviada, los procesos de mutación y de selección natural, que fueron responsables de la creación y mantenimiento de estructuras biológicas. Las explicaciones funcionales son los intentos de aislar los efectos o disposiciones de una estructura que fue responsable de la selección natural para la estructura. Por lo que las reclamaciones funcionales son "teleológicas" – teleofuncionales - sólo en este sentido darwiniano específico.

### **Descripción modular de los sistemas autopoieticos**

Para poder entender mejor cómo se comportan un gran número de componentes heterogéneos en los sistemas biológicos requiere la consideración de cada una de sus interacciones de forma modular.

En el desarrollo de una biología modular, los compartimentos celulares son comprendidos como módulos, es decir como unidades coherentes que a su vez forman parte de unidades más amplias de uniones de varias partes que interactúan entre sí, y que trabajan para alcanzar un objetivo común, realizando cada una de ellas una tarea necesaria para la consecución de dicho objetivo.

Esta descripción perceptiva de la biología coincide con la descripción biológica de los organismos que Jakob von Uexküll (1905) refleja en esta frase:

“La vida puede ser sólo un organismo y que cada organismo se compone de órganos vivos y éstos órganos a su vez de otros órganos vivos. Y mientras todo esto está vivo, cada uno de los componentes que viven juntos existen por sí mismos con arreglo a un plan firme.”

La modularidad se ha observado en todos los sistemas y puede ser estudiado en casi todas las escalas de la organización (las interacciones moleculares hasta el final hasta que todo el organismo).

Es importante tener en cuenta dos aspectos que resuelven dicha compartimentación modular:

Que la capacidad de un sistema para organizar unidades discretas e individuales, en general puede aumentar la eficiencia de la actividad de la red y, en desde un punto de vista biológico, facilita fuerzas selectivas sobre la red.

Que la pleiotropía genética, es decir la capacidad de un gen de actuar en diferentes desarrollos fenotípicos no conexos – siendo un modo de evolución de la actividad modular<sup>160</sup> – es un comportamiento que puede extrapolarse en otros desarrollos modulares como podría ser en las proteínas<sup>161</sup> pero en desarrollos epigenéticos (tanto en genética evolutiva como en biología evo-devo).

Vamos a defender en nuestro trabajo la modularidad biológica de los organismos como una capacidad autopoyética inter-independiente en su cierre operativo, es decir en su enactividad propia. Pero a su vez al ser comprendidas en un sistema agencial, desarrollan una capacidad inter-dependiente a su vez para precisar el equilibrio homeostático y homeodinámico de los procesos en una maximización de eficacia y en una lucha por la disfuncionalidad. Y esto no solo va dirigido a los organismos pluricelulares, también es definible en los unicelulares en donde los componentes organulares funcionan como organismos en sí conectados en red. Por otro lado la modularidad cohesiona el sentido teleofuncional y teleomecánico – específicamente teleodinámico – del organismo superior que engloba los módulos conexos. Este es el sentido de un encaje teleonómico entre las estructuras que desarrollan una estabilidad funcional y, por tanto teleofuncionales como es el equilibrio homeostático, y estructuras disipativas que permiten la agencialidad en una organización teleodinámica como es el equilibrio homeodinámico. Este es un discurso biosemiótico coherente, epistémicamente falsable, que permite una actualización de las descripciones de Uexküll de las “Funktionkreises”, como un desarrollo de redes modulares que responden y actúan según el objetivo común o, lo que es lo mismo, su Planmäßigkeit (conformidad a un plan) y con ello a una causa final o mejor dicho funcional.

La correlación entre módulos, como he comentado anteriormente, es inter-independiente e inter-dependiente a la vez, pero en diferentes planos de causación. Leonardo Bich (2012) muestra que el estado de un subsistema, en un cierto instante, no es directamente dependiente del estado de otro subsistema en ese mismo instante que, de alguna manera, están desacoplados. Sin embargo, los dos subsistemas no son independientes, sino que están relacionadas indirectamente a través del sistema que se integran (por ejemplo, por causas comunes, etc.)

Aquí podemos establecer un ejemplo en organismos unicelulares donde la motricidad requiere de una actividad receptora de señales del entorno (concentración del pH, temperatura, alimentos o elementos nocivos y/o peligrosos, etc.) concentrada en la membrana celular y que los filamentos de actina-miosina permiten, junto a las estructuras microtubulares de mantener la forma del organismo (como si fueran “huesos” protéicos). Dichos filamentos de actina-miosina se organizan en paralelo en el citoplasma celular a la hora de recibir señales de la membrana extracelular que vectoriza

---

<sup>160</sup>Selección constructiva. Ver: Wagner, G. P. (1996) *Homologues, Natural Kinds and the Evolution of Modularity*. American Zoologist. 36, pp. 36-43.

<sup>161</sup> Para entrar en más detalles ver: Trifonov, E. N., ZM Frenkel, Z. M. (2009) *Evolution of protein modularity*. Current Opinion in Structural Biology. 19, pp. 335-340. y Baker, C. R., Booth, L. N., Sorrells, T. R., Johnson, A. D. (2012) *Protein Modularity, Cooperative Binding, and Hybrid Regulatory States Underlie Transcriptional Network Diversification*. Cell. 151, pp. 80-95.

el propósito motriz del organismo. Igualmente pasa en los rotores de los cilios en las células flageladas (tanto procariotas como eucariotas). Es por eso que estructuras físicas inter-independientes entre sí, desempeñan actividades interdependientes que permiten ensamblar percepciones bioquímicas o biofísicas del entorno para ser decodificadas en el interior de la célula y efectuar una reactividad biofísica y/o bioquímica para poder ir a por el alimento detectado y deseado.

El descubrimiento de las estructuras modulares, jerárquicas que captura el comportamiento de los sistemas complejos de una manera causal (Hartwell, Hopfield, Leibler y Murray, 1999) es esencial para acelerar la resolución de estos problemas difíciles. Esto pone de relieve la necesidad de desarrollar métodos heurísticos para descubrir módulos. Porque, como bien dice Christof Kock (2012), si los módulos correspondientes no se pueden encontrar, la comprensión de la vida se nos escapa. No obstante tanto el desarrollo aleatorio de la evolución genética como la implicación agencial en la relación organismo-entorno como un todo nos hace pensar que es equívoco tomar la comprensión de la vida desde la computación algorítmica de multisistemas, todo y que son imprescindibles para conocer las restricciones fisicoquímicas de los agentes así como capturar las condiciones conductuales agenciales a las que dedicamos tiempo a nuestras investigaciones. Tomamos partido a una visión metamatemática de la vida desde el principio de incompletitud de Gödel, donde la consistencia de los conocimientos biológicos compatre la incompleta captura de sus relaciones Umwelt-Innenwelt, debido a la carencia de conocimientos de la biología “subjetiva” de los agentes en la percepción de su entorno significativo, un punto de vista muy controvertido que el barón von Uexküll tomo como criterio para una mayor comprensión de la biología<sup>162</sup>.

### **Agencias y agentes**

Este planteamiento de vías de satisfacción de las estructuras biológicas hace compatible actualmente con el concepto de “agency” o “agencia”. Dicho concepto se fundamenta en otros tres conceptos: el de individualidad, el de asimetría y el de normatividad (Barandarian, Di Paolo y Rohde 2009). El desarrollo de la individualidad biológica es comprendido como la facultad de una estructura autoorganizadora robusta en mantener su estabilidad estructural que interactúa con su Umwelt frente a las condiciones de asimetría interactiva espaciotemporal entre el sistema y su entorno (que siempre será mayor que su Umwelt percibido). Mientras que la normatividad son las clases de modulaciones que el organismo necesitará incorporar y adecuar en sus circuitos funcionales para acoplarse a dichas asimetrías, evitando de este modo que peligre su estabilidad autopoietica y por lo tanto su supervivencia. Por lo que Barandarian y sus colegas definen el concepto de “agencia” como “*una organización autónoma que regula adaptativamente su acoplamiento con su entorno y contribuye a sostenerse a sí misma como una consecuencia*” (Barandarian, Di Paolo y Rohde 2009).

---

<sup>162</sup>Uexküll, J. v (1931) *Die Rolle des Subjekts in der Biologie*. Naturwissenschaften, 8. Mai 1931, Volume 19, Issue 19, pp 385-391.

Ahora bien, haciendo repaso al concepto de “agente” que Barandarian y sus colegas realizan, me detengo por un instante ante dos conceptualizaciones que me llaman la atención. La primera es la definida por Stuart Russell y Peter Norvig en su manual de IA (Russell y Norving 1995) donde un “agente” es “*cualquier cosa que pueda ser observado como perceptor de su entorno a través de sensores y que actúa sobre el entorno a través de efectores*”<sup>163</sup>. La segunda es la generalización de Xabier Barandarian que abstrayéndose lejos de las definiciones ofrecidas anteriormente (en su artículo las de Russell y Norving, la de Maes, Beer, Smithers, Franklin y Graesser, Kauffman, Ruiz-Mirazo y Moreno, y finalmente la de Christensen Hooker) generaliza que una “agencia” implica, al menos, “un sistema que hace algo por sí mismo de acuerdo con ciertas metas o normas dentro de un entorno específico”<sup>164</sup> (Barandarian, Di Paolo y Rohde 2009). Finalmente Ruiz Mirazo y Moreno (2000) defienden que los “*agentes autónomos mínimos*” son los sistemas químicos capaces de restringir activamente sus condiciones de contorno para automantenerse.

Observo que, entre la definición de “agente” de Russell y Norving, y la de “agencia” de Barandarian, hay aspectos donde la vectorización de cada palabra empleada es referenciable a las definiciones ofrecidas por Jakob von Uexküll para los organismos vivos que han podido ser referenciados por Claus Emmeche y Soren Bier para la biosemiótica y la cibersemiótica. Por un lado en Russell y Norving decir que un agente es “*cualquier cosa que pueda ser observado como perceptor de su entorno a través de sensores y que actúa sobre el entorno a través de efectores*” hace referencia a sensores como órganos perceptores y que Uexküll denomina “Merkorgan” y los receptores “Wirkorgan” que interactúan sobre el entorno. ¿Qué entorno podemos hablar? De aquel que es percibido por los “Merkorgan”, del entorno familiar – denominados “Merkwetnen” – filogenéticamente hablando y que se desarrolla ontogenéticamente a través de los circuitos funcionales o “Funktionkreises”: su Umwelt o “campo de percepción multisensorial del entorno significativo que le circunda”. Circuitos que generan la normatividad y las restricciones del Umwelt percibido.

Por otro lado tenemos la definición de Barandarian de “agencia” o “agencialidad” como un sistema que hace algo por sí mismo de acuerdo a ciertas metas (goals) o normas (norms) dentro de un entorno específico. Veamos las metas o las normas si son equivalencias homeomórficas o se tratan de dos líneas de actuación (independientes o interdependientes). Barandarian y colegas utilizan los términos de “norma” y “meta” indistintamente, por lo que son tratados de manera equivalente – aun el reconocimiento de la especificidad normativa como procedimiento o situación límite que debe ser respetada, mientras que las metas infiere a estados de referencia específicos. También reconocen que ambas no se puede deducir de las leyes universales por ellas solas, sino

---

<sup>163</sup> Russell, S. J., Norvig, P. (1995) *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.

<sup>164</sup> “we can generalize that agency involves, at least, *a system doing something by itself according to certain goals or norms within a specific environment*”. Las cursivas son de los autores en el artículo. Quiero especificar dichas cursivas como fundamento definitorio del concepto de “agency”. Barandarian, X., Di Paolo, E., Rohde, M. (2009) *Defining Agency. Individuality, Normativity, Asymmetry and Spatio-temporality*. Adaptive Behavior. Vol. 17, Nº 4, p. 368.

que aparecen como regularidades contingentes con un sentido del deber-ser en sí mismos: la norma se debe seguir, no hacerlo se convierte en un fracaso.

Sin embargo los agentes regulan de forma activa sus interacciones – es decir desde la presencia de los componentes del entorno y su “percatación” de los mismos – y el presente reglamento puede producir el fracaso o el éxito de acuerdo con alguna norma. Esto es lo que llamamos la condición normatividad. Barandarian y colegas exponen que sólo podemos tener sentido de las normas como el resultado de un conjunto específico de condiciones que permiten (proscriben) y demandan (prescriben) a un sistema para distinguir entre los diferentes resultados físicos de su acoplamiento con el medio ambiente. Por lo que el agente es concebido como “*una organización autónoma capaz de regular adaptativamente su acoplamiento con el medio ambiente de acuerdo con las normas establecidas por sus propias condiciones de viabilidad*”<sup>165</sup>.

Lo que observo en esta descripción de Barandarian y colegas del concepto de agencia y de agente son una conjunción de condiciones neodarwinistas *prescriptivas* de normatividad que emergen con la condición postdarwiniana *proscriptiva* de la meta<sup>166</sup>. Es decir, una referencia de constreñimientos como salvaguarda de la individualidad orgánica – prescripción normativa – enlazada a todas las posibilidades de acceso a las necesidades de la supervivencia del individuo – meta como proscripción – en función de las condiciones del Umwelt, es decir del medio inmediato percatado en la condición espacio-temporal con la que se encuentra y con las limitaciones de su posibilidad de interacción.

Por eso afirma Barandarian que la modulación adaptativa de las limitaciones del acoplamiento (que también pueden ser restricciones globales sobre las operaciones de las partes del sistema) debe ser emergente (lo que significa que no se puede atribuir a un sub-sistema del agente encargado de la regulación, una especie de control central). Esta parece ser una cuestión de necesidad lógica que fortalece la condición de posibilidad de la cognición en organismos que no requieren de sistema nervioso para su desarrollo en la adaptación. Barandarian y colegas afirman que “los subsistemas que regulan de acuerdo con una norma fija independiente del estado actual del agente y actuar como organización dinámica restricciones externas en el sistema, se encuentran fuera de su esfera de influencia. Por lo tanto, sólo las modulaciones emergentes de las limitaciones que afectan el sistema como un todo puede ser sensible a las normas definidas por el sistema”<sup>167</sup>. Por lo que no sólo las modulaciones de las limitaciones de acoplamiento adaptativo son emergentes en el sistema, también son *enactivas* en su desenvolvimiento de las habilidades puestas en juego en el contexto de la agencia, y en las aptitudes de los agentes. Por lo que la inherencia de los procesos espacio temporales de la agencia no es únicamente extensible al ojo del observador, sino sobretodo en la propia perspectiva del agente. Es un estatus fenomenológico que tiene dependencia de la forma de la agencia.

---

<sup>165</sup> Barandarian, X., et al. (2009) *Opus Cit.* p. 376.

<sup>166</sup> Tanto las condiciones prescriptivas como proscriptivas son diferenciadas por Varela, Thomson y Rosch 1991. Más adelante lo tratamos dentro de los estudios históricos de las ciencias cognitivas.

<sup>167</sup> Barandarian, X., et al. (2009) *Opus Cit.* p. 376.

## Buffer: amortiguador y almacén de señales

Ahora bien, Barandarian afirma para que un sistema pueda autoregularse debería de tener alguna forma de buffer o tampón que amortigüe, por ejemplo el pH ácido del entorno en su citoplasma, es decir un distanciamiento entre la perturbación inmediata y la posibilidad de compensar por ello (Ruiz-Mirazo y Mavelli 2008)<sup>168</sup>. Pero la noción de buffer lleva también consigo la noción de almacenador de datos, es decir un depósito de memoria de procesamiento de dichas informaciones, y de hecho los organismos sencillos ya trabajan con lo que se considera memoria química (Hanczyc y Ikegami 2010; Dale y Husbands 2010; Reid, Latty, Dussotour, Nakagaki, Kobayashi y Ishiguro 2012). Por ello, hemos de tener en cuenta que toda perturbación puede verse por un sistema autopoietico como un “signo” interpretado según su estructura interna (Weber 2002, Luisi 2006). Esta perturbación forma parte del registro amortiguador del buffer – que suelen ser macromoléculas no reactivas surfactantes (membranas celulares o microtúbulos que forman anoxemas o centriolos, etc.)– pero que su huella de impacto adquiere también un registro que perdura en el tiempo según la estabilidad estructural del agente (termodinámicamente, hidrodinámicamente, hidromagnéticamente, etc.).

Acogemos entonces el concepto de “*buffer*” como un doble juego de “amortiguador de variables entre Umwelt e Innenwelt” y “repositorio semiótico”. Veamos que queremos decir con esto. Por un lado dicho buffer hace de tampón entre las variables de las señales químicas – pH, quimiotaxis, etc – que denominaremos “semioquímicas”, y los registros físicos – como los fotones o presión háptica, etc. – que denominaremos “semiofísicas”, creando así un umbral de tolerancia por cada registro semiótico con el que se pone en juego la supervivencia del organismo. Por otro lado dicho buffer obtiene registros que tendrán una impronta asentada en las experiencias de resistencia como constricciones de libertad que le permitirán obtener afinidades bioquímicas, biofísicas y del ecosistema o de los registros del medio inmediato, su Umwelt. Dichas afinidades toman una lectura prospectiva como hemos explicado anteriormente, en tanto que “lo que no destruya la supervivencia de la autopoiesis y de la individualidad – tanto de la identidad unitaria como de la organización plural emergente – está permitido”. Esta *prospectividad* ha de ser una respuesta a una memoria celular que puede tener registros de principios mínimos de adaptabilidad. Estos pueden ser tanto de memoria química como memoria biofísica o también de su Umwelt.

Primero ese buffer en su actividad amortiguadora y de registradora de cada umbral de tolerancia es un procesador de señales que permite primero un registro sensible temporal, dejando huella (epigenética) tanto en la membrana celular como en el

---

<sup>168</sup> El problema que trata de resolver el buffer es el de los efectos devastadores que las fluctuaciones pueden tener sobre los sistemas químicos pequeños. Estas fluctuaciones son el resultado de fuerzas brownianas y otras fuentes estocásticas en el sistema. Cuando los sistemas químicos son lo suficientemente grandes, las fluctuaciones de estos locales pueden a menudo despreciarse debido al efecto promediado de salida en inmenso número de componentes. Pero los sistemas pequeños son propensos a las fluctuaciones desestabilizadoras locales. La introducción de elementos no reactivos en este sistema sirve para absorber el efecto de estas fluctuaciones y aumenta la estabilidad del sistema. Barandarian, X. (2008) *Mental Life. A naturalized approach to the autonomy of cognitive agents*. Tesis doctoral.

citoplasma, donde se recurre por ejemplo en semioquímica, a mensajeros de segundo orden como el AMP cíclico como transductor de señales, afectando a orgánulos y ribosomas. Y digo registro sensible temporal porque depende del factor tiempo su modulación como factor de cambio, como por ejemplo en una velocidad determinada (como catalizadores de modular una velocidad de reacción) o como el arrastre de los ritmos determinados por los otros (por ejemplo, modulación de frecuencia y amplitud). En el caso semiofísico los registros sensibles afectan igualmente a la membrana celular y al citoplasma como efecto de resiliencia, por ejemplo a las deformaciones de las presiones de contacto con células adyacentes, por lo que la acción del citoplasma reside en un fenómeno de “tenseguridad” a través de los microtúbulos y otros microfilamentos como la actina que conforman el “esqueleto celular”, al igual que la gelación o cambios sol-gel del citoplasma celular<sup>169</sup>. Pero también pueden obtener registros de señales fotónicas sea como fototaxis positiva (atracción a la luz) o negativa (retracción lumínica), a través de la captación fotónica en la membrana y por los microtúbulos que actúan como visores (Albrecht-Buehler 1998). Ampliaremos estos dos aspectos semiofísicos (tenseguridad y fotosensibilidad microtubular) puesto que los caracterizamos como activadores de procesos mínimos cognitivos tanto por su constructividad optimizadora como por su capacidad de procesamiento de registros del Umwelt (campo de percepción del mundo externo) y de su Innenwelt (o campo de percepción del mundo interno) para su supervivencia.

Segundo, el sentido de buffer como “repositorio semiótico” tenemos la capacidad de reconocimiento de otras moléculas. Esta fase de detección de señales químicas se dan en las proteínas llamadas “reguladoras”, asegurando lo que Jaques Monod denomina actividades coherentes, orientadas y constructivas – o performance teleonómicas – básicas o de última instancia que son las propiedades “estereoespecíficas”. Monod lo define de esta forma: “*se trata, literalmente, de una propiedad discriminativa (sino cognitiva) microscópica*”<sup>170</sup>. Ya volveremos al tema de la concepción teleonómica de Monod más adelante. Lo que queremos observar de cerca es la concepción cognitiva de la propiedad de la detección y la discriminación de la estereoespecificidad molecular. De hecho Monod define la estereoespecificidad como la capacidad de “reconocer” a otras moléculas según su *forma*, que es determinada por su estructura molecular<sup>171</sup>.

Monod compara la capacidad cognitiva de las enzimas de la discriminación de la estereoespecificidad de enlaces no covalentes con el comportamiento de un demonio de

---

<sup>169</sup> Para una mayor comprensión del fenómeno de fase de transición de solución a gelación “sol-gel” del citoplasma ver Pollack, G. H. (2001) *Cells, gels and the engines of life; a new, unifying approach to cell function*. Ebner and Sons Publishers, Washington. Especialmente el capítulo 8. pp. 113-130. En él Pollack hace una comparativa entre la función celular y la función de gelación en la fase de transición sol-gel citoplasmático.

<sup>170</sup> Monod, J. (1970) *El Azar y la Necesidad. Ensayo sobre la Filosofía Natural de la Biología Moderna*. Ed. Tusquets. Col. Metatemáticas. 6ª edición 2000. Barcelona. p. 55.

<sup>171</sup> La estereoespecificidad está relacionada al arreglo espacial de las moléculas de los sustratos (estereoisomería), es decir, la disposición en el espacio tridimensional del volumen de la macromolécula. Así, un gran número de enzimas son específicos para los isómeros ópticos L o D (especificidad óptica). Muchas enzimas presentan estereoespecificidad, lo cual significa, que actúan sobre un solo estereoisómero del sustrato.

Maxwell. Esto supone la siguiente argumentación. Revisemos de forma simplificada el ejemplo de Monod de discriminación ejercida por una enzima como la fumarasa que cataliza la hidratación del ácido fumárico en ácido málico y que, de forma reversible, deshidrata el ácido málico en fumárico. Existe un isómero geométrico del ácido fumárico que es el ácido maleico, capaz de hidratarse también. Pero la fumarasa no se activará con el ácido maleico. Para más inri, hay dos enantiómeros del ácido málico, el levógiro (a. L-málico) y el dextrógiro (a. D-málico). Siendo imágenes especulares o de espejo entre sí, la fumarasa discrimina de forma que sólo deshidrata el ácido L-málico para producir ácido fumárico; pero a partir del ácido fumárico la fumarasa produce exclusivamente ácido L-fumárico y no el dextrógiro.

No obstante, los datos actuales sobre la estructura de las enzimas han llevado a modificar el modelo clásico de la llave y su cerradura para explicar la especificidad de la reacción enzimática. Actualmente se considera que esa especificidad radica en la naturaleza de los aminoácidos de fijación<sup>172</sup> del centro activo. Realizada esa fijación o anclaje, la enzima puede modificar su forma y amoldarse parcialmente sobre el sustrato, de forma que el centro catalítico quede correctamente situado para actuar. Entonces no existiría como en la llave y la cerradura una adaptación predeterminada, sino una adaptación inducida por los aminoácidos de fijación.

En lo que atañe al complejo “fumarasa – ácido fumárico” (enzima-sustrato) para que produzca ácido L-málico, debemos de tener en cuenta no sólo la explicación de la presencia masiva en la biosfera del ácido L-málico, sino que según el principio de conservación de la simetría de Curie<sup>173</sup>, si los efectos conocidos manifiestan cierta disimetría (ausencia de elementos simétricos) esto debe ser encontrado en las causas que han generado esos efectos. Esto quiere decir que la fumarasa estudiada por Monod constituye la “fuente” de disimetría, o sea que es ópticamente activa. Mas la simetría inicial del sustrato (el ácido fumárico) puede perderse en el curso de su interacción con los aminoácidos de fijación de la enzima (fumarasa), y por lo tanto la reacción de hidratación tenga lugar en el denominado “complejo” temporal de la enzima con el sustrato. Por lo que la formación del complejo estereoespecífico – dice Monod – al ser prelude del acto catalítico, se considera ejecutora de, primero la elección exclusiva de un sustrato, determinada por su estructura estérica; y segundo, la presentación del sustrato dependiendo de la orientación concreta que restringe y especifica el efecto catalítico de los grupos inductores. Mientras que nosotros al provocar, por ejemplo la aminación del ácido fumárico con los medios de la química orgánica, obtenemos dos

---

<sup>172</sup> Los aminoácidos de unión o fijación son los sujetan la apoenzima –la parte proteica de la composición de la enzima- al sustrato y orientan la molécula de éste de tal manera que aproximan la parte que ha de ser atacada por la enzima al sitio catalítico de ésta.

<sup>173</sup> El principio de Curie —propuesto por Pierre Curie en 1894 — puede ser enunciado como el principio que establece que la simetría de una causa se preserva en los efectos. En sus palabras: “Cuando ciertas causas producen ciertos efectos, los elementos de simetría de las causas deben encontrarse en los efectos producidos” (Chambers 1970). El principio fue reformulado, en 1920, por Francis Mauritius Jaeger de la siguiente manera: “Los efectos pueden tener la misma simetría o una más alta que las causas, pero esas últimas no pueden tener una simetría más alta que los efectos producidos”. Jaeger, F. M. (1920) *Lectures on the Principle of Symmetry and Its Application in All Natural Sciences*. 2nd Ed., Elsevier, Amsterdam.

isómeros ópticos del ácido aspártico, la enzima por lo contrario cataliza exclusivamente la formación del ácido L-aspártico. Esta performance de la enzima-sustrato es una actividad coherente, orientada y constructiva, que es denominada por Monod como “teleonómica”, y es a su vez una elección binaria, pues hay dos isómeros. Pero el reconocimiento informativo, es decir la *amplificación* de dicha información – para recrearla y distribuirla después en diversos ciclos metabólicos – requiere de una energía que no proviene de la enzima misma, es decir de la fumarasa, sino de la energía potencial de la solución del ácido fumárico, del sustrato. Por lo que, en general, su capacidad de “decisión”, consiste en reconocer a sus materias primas y las acciones a desempeñar que están codificadas —en términos de información— en la propia secuencia de aminoácidos de la proteína, a lo que reconoció dicha actividad catalizadora de la enzima con previa formación del complejo estereoespecífico no covalente como la de un demonio de Maxwell.

El demonio de Maxwell es en realidad un experimento mental, una figura ideada por James Clerk Maxwell en 1867, para ilustrar la actividad del segundo principio de la termodinámica, en donde dos cuerpos a diferente temperatura no se puede transmitir el calor del cuerpo frío al cuerpo caliente, o lo que es lo mismo, que la entropía no puede decrecer. El demonio de Maxwell está ideado para realizar la inversión de la entropía, actuando a nivel molecular en la selección y en la separación de las moléculas calientes de las frías, es decir, el demonio “escoge” las moléculas más rápidas (de mayor energía) y las separa de las moléculas más lentas (de menor energía), resultando que dicho demonio, bajo el ejercicio de su función cognitiva, pudiese mantener dos espacios separados termodinámicamente sin consumo aparente de energía.

Como las funciones cognitivas del demonio no eran mesurables, la “paradoja de Maxwell” – como también se le conoce a dicho experimento mental – se escapaba de todo análisis en la naturaleza tanto física como biológica.

No fue hasta 1929 con Leó Szilárd, y posteriormente por Léon Brillouin quienes resolverían la paradoja en posibles versiones “reales”. Szilárd señaló que un demonio de Maxwell de la vida real de tendría que tener algún medio de medición de la velocidad molecular, y que el acto de adquirir información requeriría un gasto de energía. Puesto que el demonio y el gas están interactuando, debemos considerar la entropía total del gas y el demonio combinados. El gasto de energía por el demonio causará un aumento en la entropía del demonio, que será más grande que la disminución de la entropía del gas. En 1960 Rolf William Landauer propuso una excepción a este argumento. Se dio cuenta de que algunos procesos de medición no es necesario aumentar la entropía termodinámica mientras que sean termodinámicamente reversibles. Sugirió que estas medidas “reversibles” podrían ser utilizadas para clasificar las moléculas, en violación de la segunda ley. Sin embargo, debido a la conexión entre la entropía termodinámica y entropía de la información inteligentemente propuesta por Brillouin, esto también significa que la medición registrada no debe ser borrada. En otras palabras, para determinar si debe dejar una molécula a través de, el demonio debe adquirir información sobre el estado de la molécula y, o bien descartar o almacenarla. Descartando que

conduzca a un aumento inmediato de la entropía, pero el demonio no puede almacenar indefinidamente. En 1982 Charles Henry Bennett un físico de la IBM Research mostró que con el tiempo el demonio se quedará sin espacio de almacenamiento de información y debe empezar a borrar la información que ya ha reunido. El borrado de la información es un proceso termodinámicamente irreversible que aumenta la entropía de un sistema. Pero lo que aparenta ser un sistema térmicamente aislado es en realidad un sistema cinéticamente abierto, donde es posible transferir movimiento entre dos sistemas. Personalmente conjeturo que el borrado de esta información es paralelo o directamente proporcional a la limitación que tienen las células originales a subdividirse, es decir, a su mitosis. La disminución o silenciamiento de la función amplificadora de las enzimas que refuerza las señales químicas está vinculado, al igual que determinados genes, al frenado de la subdivisión celular<sup>174</sup>. Este es un estudio que va más allá del propósito de dicho trabajo de investigación, pero que puede contribuir a una mayor comprensión de la actividad de la metástasis celular en relación con el denominado “Bennet acceptance ratio”<sup>175</sup>.

Algo tan aparentemente metafórico como es la capacidad de “reconocimiento” del sustrato por parte de la enzima, es no tan sólo un discurso “biofilosófico” sobre la argumentación de un posible factor de los principios mínimos cognitivos clasificable en una biosemiótica de primer orden, es decir a nivel molecular, sino que también es un factor imprescindible para la comprensión de los factores que originan disfunción en determinados estudios oncológicos. Es decir, la recopilación exponencial de información como factor de crecimiento de la subdivisión celular en metástasis puede tener un factor clave en la teleonomía del silenciamiento de la función del buffer como almacenador de señales químicas, y así proporcionar significado al concepto de “coherencia” dentro de las performances de las proteínas en tanto que es un *factor de adecuación*<sup>176</sup> – y por lo tanto una función nomológica – de la función constructiva del crecimiento celular tanto en organismos complejos como en organismos simples. Desde luego esta observación va más allá de nuestra investigación en estos momentos, pero es un ejemplo que

---

<sup>174</sup> Es importante señalar que dicho sistema de relé de información, no sólo contraargumenta la explicación de Bennett, sobre la incapacidad de borrado de información, sino que dicho frenado informativo es un factor compensatorio de la cantidad de energía que se gasta para mantener un balance neguentrópico, que a su vez, la naturaleza selecciona como factor inhibitorio del crecimiento celular exponencial que afecta directamente a la generación de tumores cancerígenos, según los trabajos de Yossi Yarden del Weizmann Institute of Science en Rehovot, Israel. El profesor Yarden está trabajando, entre otros casos, con un grupo de glicoproteínas transmembrana cuya función es la de estimular la tirosina quinasa citoplasmática en el factor de crecimiento de unión a la parte extracelular del receptor, y la inducción de la formación del dímero enzima-sustrato, como clave para la comprensión de dicho factor de crecimiento activado en las superficies receptoras de las células cancerosas.

<sup>175</sup> La ratio o razón de aceptación de Bennett, abreviada como BAR, es un algoritmo que estima la diferencia de la energía libre entre dos sistemas, normalmente trabajados en simulación computerizada, implementado en sistemas dinámicos moleculares tipo GROMACS (una máquina de simulaciones químicas), utilizando métodos de integración termodinámica o simulaciones de Monte Carlo entre otros.

<sup>176</sup> Este *factor de adecuación* es distinto al de adaptación en tanto que la adaptación tiene como objetivo la incorporación de mecanismos tanto biofísicos como bioquímicos para la permanencia en un entorno determinado, mientras que el factor de adecuación genera un balance de permanencia en función de los ciclos funcionales que permiten la estabilidad estructural del agente, tanto en un Umwelt homeostático, homeodinámico o heterodinámico (como por ejemplo las neuronas implicadas en las vías perceptivo-conmemorativas o actualmente denominadas áreas de asociación de Cajal, Fleching y Tanzi).

contempla la competencia interdisciplinar – y, si se me permite, transdisciplinar – de la biosemiótica, en su grado efectivo, para el desarrollo epistemológico y de la dimensionalidad que adquiere la interpretación de los procesos fisiológicos (en este caso) y morfológicos de la autoorganización celular.

Aparte, la concepción de la actividad enzimática fue estudiada también como una acción verbal en comparativa entre comunicación y biología (Paton y Matsuno 1998). Las enzimas son moléculas que hacen posible el metabolismo. Las posibilidades de procesamiento son considerables no sólo como catalizadores, sino que también contribuyen al procesamiento de la información, la integración, la coherencia y la memoria en la célula. Este complejo de atributos sugiere que una perspectiva complementaria a la naturaleza de enzima y la actividad necesita ver la relación que las enzimas y los verbos tienen en común. El valor de este tipo de pensamiento es que cambia el enfoque de los objetos y los mecanismos de los procesos y la información. Uno de los ejemplos de las actividades enzimáticas relacionadas con los verbos es la de ser ‘pegamento’, como una capacidad integradora (Paton 1997). El rol del ‘pegamento’ en coherencia llega a ser especialmente evidente cuando consideramos jerarquías biológicas en el que dicho rol ofrece una idea más general de incrementar los niveles de significado, como asevera Polanyi (1968), al igual que Albrecht-Buehler (1990) que utiliza el sentido de ‘pegamento’ para su análisis de la naturaleza de la información, en la que emparenta con el concepto termodinámico de neguentropía acuñado por Brillouin.

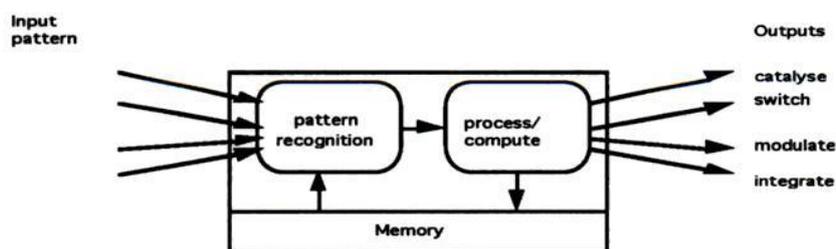


Figura 4. Representación de el procesamiento de señales de una enzima modelo Calmodulina quinasa II (CaM K) con un buffer de almacenamiento de memoria (Paton, Staniford y Kendall 1996). Las proteínas quinasas y fosfatasa presentan una serie de capacidades “cognitivas” que incluye el reconocimiento de patrones, el manejo de datos difusos, individualidad, capacidad de memoria, configuración interna y sensibilidad al contexto (Fisher, Paton y Matsuno, 1999).

Todas estas descripciones en biología molecular como en la lingüística no satisfacen una real descripción de los acontecimientos. Aunque tratar de entender la estereoespecificidad no covalente del complejo enzima-sustrato y su capacidad termodinámica de aprovechar el potencial energético de la adherencia para reconocer la topología de la proteína que ha de catalizar la enzima nos permite comprender que no podemos mantenernos en el estrato jerárquico molecular de las descripciones funcionales si queremos que emerja un sentido admisible de la autoorganización, más rica y profunda que una explicación irreducible de ladrillos morfológicos para describir la autopoiesis de los organismos vivos. Siempre y cuando tengamos cuenta que el

autoensamblaje proteico sea entendido como un proceso necesario, aunque no suficiente de la autoorganización, la actividad cíclica de las enzimas podría sugerir un proceso autoorganizativo que supera el proceso de autoensamblaje en tanto que hay una dinámica de equilibrio termodinámico en juego que no lo está en el plegamiento de las proteínas. Por eso, y para evitar dicha irreducibilidad significativa, estamos dispuestos a ofrecer una explicación no molecular de los principios mínimos de cognición que, fundamentados en su morfología funcional, se superviene acciones que determinan interpretaciones de conducta que, como hemos visto, van más allá de ser adaptativa. Son adecuadas, o incluso estamos dispuestos a aventurarnos a expresar como *conducta “inteligentemente” adaptativa, en tanto que podremos fundamentar el concepto de “inteligencia adaptativa” como una mejora cualitativa en la conducta adaptativa, a través de principios mínimos cognitivos descritos no sólo en organismos sin sistema nervioso, sino también en compartimentos celulares los cuales hemos reconocido como subsistemas autopoiéticos.* Como expresa Barandarian y Di Paolo: una acción “es un evento estructurado, con fases claramente definidas de inicio (la detección de una tendencia negativa), de aceleración (la activación del mecanismo de adaptación), de consumación (el vuelco de la tendencia negativa) y de cadencia (activación de la respuesta adaptativa)” (Di Paolo 2005: 442). La estructura temporal de la conducta puede aparecer como una jerarquía anidada de modulaciones que a su vez se convierte en crucial si vamos a diferenciar entre los tipos de acoplamientos: acciones, tareas, formación, aprendizaje, desarrollo, etc. (Barandarian 2008).

### **Codeterminación entre agente y Umwelt**

Para poder formular adecuadamente estas cuestiones en un marco tan adecuado como coherente tenemos que incorporar la condición de posibilidad cognitiva en un marco que como hemos visto es agencial, donde el Umwelt y el Innenwelt se construyen mutuamente ante sus dinámicas diferenciadas y normalizadas desde una orientación *proscriptiva* que permite toda interacción no prohibida, es decir que supera el umbral de la supervivencia conformando modificaciones satisfactorias. La autoorganización orientada hacia tareas específicas – lo que en clave de Monod, denominaré “coherencia teleonómica” – se sirve de ciertas estrategias evolutivas que permiten constatar tendencias donde emergen desempeños cognitivos. Pero que hayan estas estrategias cognitivas no implica que todas ellas devengan de forma genética, es decir que la deriva evolutiva converja hacia una mejor adaptabilidad conductual. Tampoco implican ninguna noción volitiva o intencional, simplemente refleja los caminos que el agente archiva hacia determinados objetivos según su estructura y su contexto biológico.

Existen factores morfológicos de muchos seres vivos que se han mantenido a lo largo de millones de años con ligeras diferencias. De estos seres vivos, se dice que se encuentran en estado de estasis, o de permanencia evolutiva, incluso algunos son supervivientes de un linaje de organismos. La consistencia morfológica a lo largo de millones de años en organismos primitivos como los protistas, o específicamente todos los amebozoos, han llegado hasta nuestros días gracias a una conducta adaptativa que ha ido más allá de las

referencias de resistencia al entorno. El medio inmediato es dinámico y cambia constantemente, aunque haya parámetros de equilibrio homeostático (tanto en su hábitat natural como en laboratorio) o heterostático<sup>177</sup> (artificiando en laboratorio) que fijan sus condiciones mínimas de estabilidad, así como su homeodinámica. Pero entonces ¿cómo son capaces de resolver satisfactoriamente el dominio del equilibrio heterostático y homeostático? Nos inclinamos por la versión de Varela que dice que los seres vivos y sus medios “*se relacionan mutuamente a través de la especificación mutua o codeterminación*” (Varela, Thompson, Rosch 1991, p. 231). Esto quiere decir que las regularidades ambientales son el resultado de una interdependencia mutua histórica, surgida de una larga historia de codeterminación, o que es lo mismo, de una convivencia tanto filogenética como ontogenética – por el efecto Baldwin, por ejemplo – en el desarrollo estático de los organismos simples más antiguos del planeta. Pero en dichos protistas eucariontes, así como también las arqueas y las bacterias no hay cerebro, ni sistema nervioso – ni periférico ni central – para establecer una conexión electroquímica entre células sin contacto háptico, como ocurre en los nervios o las neuronas. La percepción del entorno no es un caso de representación, puesto que no hay opción de “detección directa” visual, como supone James Jerome Gibson<sup>178</sup>. El problema no reside en la detección del estímulo del mundo circundante, en tanto que infiere en el sujeto como acción que penetra en el mundo interno, pues como habíamos visto con el problema de las enzimas, la detección de la estereoespecificidad de la proteína para la catálisis, no proviene de los estímulos fotónicos de la luz, sino del contacto háptico de la superficie volumétrica del objeto, cuyo registro en buffer es una concordancia de molde por parte de la enzima.

En las jerarquías de los agentes autoorganizables, sea citoplasma y sus componentes orgánulos, sea la propia célula con su medio inmediato (sea acuoso o de contacto háptico con otras células)<sup>179</sup>, el contacto directo conlleva a su vez una enacción sensorio-motriz. No son excluyentes sino complementarias. No estoy de acuerdo con que el entorno no necesita al sujeto, puesto que dicho sujeto es parte de un entorno jerárquicamente superior y que su enacción y su codeterminación hacen que haya una condición de posibilidad de una emergencia compleja en jerarquías superiores de complejidad vital, como podría ser una inmunología – mejor dicho, un comportamiento inmunológico – de componentes complejos de otras jerarquías superiores de

---

<sup>177</sup> “Me propongo hablar de heterostasis (heteros = otro; estasis = fijeza) como el establecimiento de un nuevo estado de equilibrio por exógenos (farmacológico) la estimulación de los mecanismos de adaptación a través del desarrollo y mantenimiento de las reacciones defensivas tisulares durmientes (...) La diferencia más notable entre la homeostasis y heterostasis, es que el primero mantiene el estado de equilibrio normal de reacciones fisiológicas, mientras que el segundo se “reajusta el termostato” para mantener un mayor estado de defensa por la intervención exógena artificial. La heterostasis se puede lograr mediante la administración exógena de sustancias naturales (por ejemplo, hormonas) o artificiales (por ejemplo, barbitúricos) induciendo respuestas de este tipo”. Seyle, H. (1973) *Homeostasis and heterostasis*. Perspectives in Biology and Medicine Vol. 16(3). pp. 441-5

<sup>178</sup> Gibson, J. J. (1977) *The Theory of Affordances*. In *Perceiving, Acting, and Knowing*, Eds. Robert Shaw and John Bransford

<sup>179</sup> Es una lástima que pudiendo establecer posibilidades psicofísicas de la percepción háptica en el estudio que Gibson (1962) hizo sobre el tacto, no pudo diferenciar las condiciones que se ofrecen en organismos inferiores.

complejidad vital, como por ejemplo un mamífero. Pero podría darse en plantas también, donde no hay propiedades visuales y sí perceptivas tanto de los substratos con los que las raíces van a escoger como “affordances” o provisiones<sup>180</sup> de su entorno del subsuelo, o también como las hojas van a accionar y reaccionar ante el ciclo de Krebs para la funcionalidad clorofílica los fotones solares, sin que por ello haya órganos ópticos para su detección, ¿o sí? Vamos a seguir mostrando propiedades competentes de compartimentos celulares o de subsistemas autopoieticos intracelulares con algunas características categóricas de principios mínimos cognitivos.

### **La percepción “óptica” de los centriolos: Primeros indicios de cognición celular**

El profesor Guenter Albrecht-Buehler de Northwestern University Medical School en Chicagopresenta nuevas pruebas que demuestran que las células coordinan sus cuerpos durante el movimiento y responden a parámetros físicos y topológicos que son demasiado débiles que han causado la reacción observada por la fuerza. Estas respuestas han sido analizadas y utilizadas para identificar la naturaleza y la ubicación de un sistema de integración de datos celulares que pueden ser responsables de estas acciones. Según sus investigaciones realizadas desde 1977 con células 3T3 (unas células de fibroblastos de embriones de ratón) Albrecht-Buehler confirma que las células son capaces de reconocerse entre ellas en su entorno de navegación y que las células hijas navegan sin chocar con las madre como si estuviesen en un espejo, entrando en mitosis – las células hijas - en la misma fase al mismo tiempo<sup>181</sup>.

Pero aún hay mucho más, Albrecht-Buehler afirma que las células eucariotas pueden detectar haces de luz para ir hacia el chorro de fotones cercanos al infrarrojo (fototaxis positiva) o huir de el (fototaxis negativa) como si tuviesen “visión”. Aunque sea metafórico el concepto de visión, en tanto que no tiene órgano óptico una célula, Albrecht-Buehler asegura que hay componentes del citoesqueleto que trabajan para procesar las señales fotolumínicas y reaccionar motrizmente de forma consecuente. La componente del citoesqueleto que por su estructura arquitectónica permite el mapeo de la longitud y la latitud de la fuente lumínica son los centriolos.

---

<sup>180</sup> Las “*affordances*” de Gibson (1986) o “*provisiones*” como comenta Varela y colegas (1991) son las oportunidades para la interacción que poseen las cosas del medio ambiente en relación con las aptitudes sensorio-motrices de los organismos vivientes. No comparto la restricción, tanto de Varela como de Gibson de las aptitudes exclusivas de los animales. Las plantas, así como las bacterias y los protistas (como los mixomicetos) tienen capacidades sensorio-motrices intrínsecas de sus estructuras morfológicas. Ningún ser vivo se escapa de su “*capacidad de sentir*” (*sentience*) como afirma Terence W. Deacon (2012).

<sup>181</sup> Albrecht-Buehler, G. (1977) Daughter 3T3 Cells. Are the Mirror Images of Each Other? Journal of Cell Biology. Nº 72. pp. 595-603.

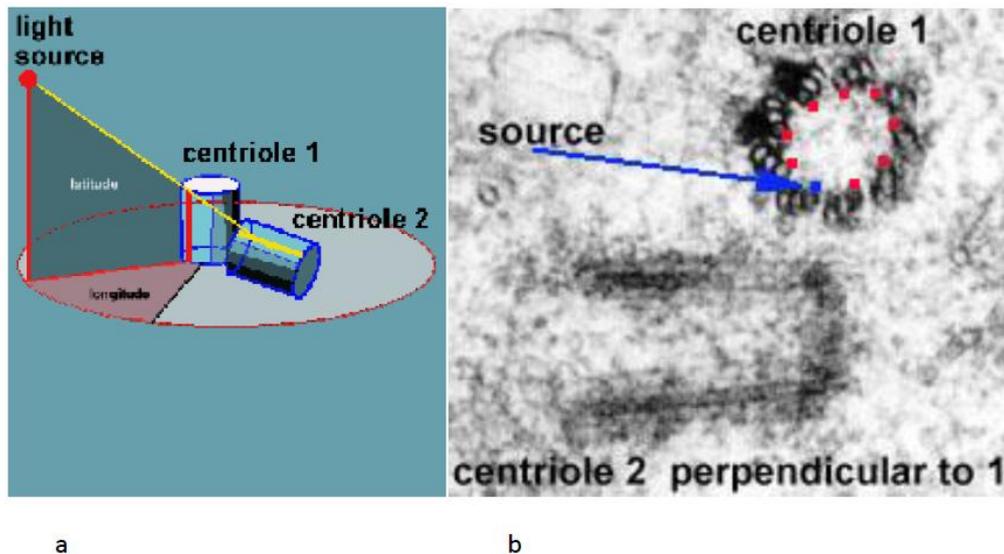


Fig 5 (a) Un par de centriolos mide la longitud (líneas rojas) y la latitud (líneas amarillas) de una fuente a través de sus rotaciones en su eje de cada cilindro, haciendo un barrido de cada triplete que forma una “persiana” con cierto ángulo de torsión cada una de los nueve tripletes de cada cilindro. (b) Foto de microscopio de dos centriolos perpendiculares. Cada persiana (triplete de microtúbulos) inclinado de un centriolo absorbe y desvía la luz de ciertas longitudes de onda, lleva un fotorreceptor en su base (ver manchas rojas en la figura) pero el lumen del centriolo es opaco para la luz. La fuente de luz es visible para uno y sólo uno de los fotorreceptores (ver flecha azul). Las demás persianas de tripletes proyectan “sombras” sobre el resto de los fotorreceptores. De la web del profesor Gunter Albrecht-Buehler <http://www.basic.northwestern.edu/g-buehler/contents.htm#cont3>

Los centriolos son una pareja de tubos que forman parte del citoesqueleto, semejantes a cilindros huecos. Estos son orgánulos que intervienen en la división celular, siendo una pareja de centriolos un diplosoma sólo presente en células animales y en los mixomicetos como el *Physarum polycephalum* (Wright et al 1988)<sup>182</sup>. Los centriolos son dos estructuras cilíndricas que, rodeadas de un material proteico denso llamado material pericentriolar, forman el centrosoma o COMT (centro organizador de microtúbulos) que permiten la polimerización de microtúbulos de dímeros de tubulina que forman parte del citoesqueleto, que se irradian a partir del mismo mediante una disposición estrellada llamada huso mitótico.

La tubulina es un dímero proteico globular – forma de cacahuete – que es la unidad básica de la arquitectura de los protofilamentos. Las tubulinas  $\alpha$  y  $\beta$  son las subunidades esenciales de los microtúbulos, mientras que la tubulina- $\gamma$  es un componente fundamental del centrosoma. Todas las células eucariotas presentan microtúbulos, lo cual indica que las subunidades que los conforman probablemente se originaron cuando los eucariotas aparecieron por vez primera, hace aproximadamente 900 millones de años. Su homóloga en bacterias es la FtsZ. La tubulina  $\alpha$  (positiva) y tubulina  $\beta$

<sup>182</sup> Durante un buen tiempo los investigadores pensaban que los mixomicetos en forma plasmodia carecían de centriolos. A partir de las investigaciones del profesor S. J. Kerr (1969) se descubren tanto en forma plasmodia (en desarrollo multinuclear unicelular) como ameboidal (de morfología mononuclear y uniflagelado).

(negativa) se dispone en un extremo del protofilamento, brindándole así su característica de ser dipolar. Esto último es importante, porque la estructura del microtúbulo está continuamente en movimiento dinámico en una contracción angular en la zona central del dímero hidrofóbica, ensamblando y desensamblando las subunidades de protofilamentos, lo cual consume energía, pero a su vez permite también los movimientos internos de la célula tan importantes como la mitosis.

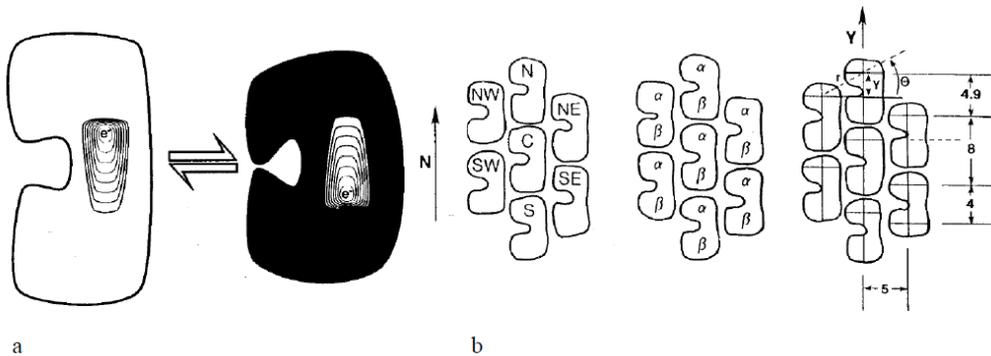


Fig 6 (a) Dos estados de la proteína tubulina en el cual se produce un suceso cuántico dentro de la región hidrofóbica con un cambio de conformación de  $10^{-9}$  a  $10^{-11}$  segundos por cada transición. Un evento cuántico se da dentro de la región hidrofóbica aquí descrito como una densidad de probabilidad topográfica del electrón. Los anestésicos generales se unen dentro de estas regiones hidrófobas y evitan transiciones conformacionales por fuerzas de van der Waals que actúan sobre evento cuántico. (b) Microtúbulos automátatas (MTA): a la izquierda, la definición del vecindad de los dímeros; en el centro, la disposición de los monómeros dentro de cada dímero, a la derecha, las distancias en nm y la orientación de la celosía de los vecindad. Las reglas de transición para MTA se basan en fuerzas electrostáticas de acoplamiento neto de cada tubulina de sus alrededores seis vecinos de tubulina. Valores de la fuerza de acoplamiento se dan en Hameroff, Rasmussen y Mansson (1999).

Los centriolos se posicionan perpendicularmente entre sí. Cada centriolo está formado por nueve tripletes de microtúbulos que forman todos estos juntos y unidos entre si un círculo. El más interno se llama microtúbulo A y está completo (compuesto de trece protofilamentos). A él se unen dos microtúbulos: el microtúbulo B que comparte tres protofilamentos con el A y el microtúbulo C, el más externo, que comparte tres protofilamentos. Los tripletes se encuentran unidos por una proteína, la nexina<sup>183</sup>. Cada protofilamento es una unidad proteica y longitudinal ensamblada en número de trece, en círculo, formando así un microtúbulo. También están formados por protofilamentos la actina y otros filamentos intermedios del citoplasma celular. La composición arquitectónica de trece protofilamentos para un microtúbulo, al igual de nueve tripletes de microtúbulos por cada centriolo (formando así una persiana angulada) es universal en todas las células eucariotas tanto unicelulares como pluricelulares. Esto hace pensar en un canon genético de una complejidad de diseño.

<sup>183</sup> <http://es.wikipedia.org/wiki/Centriolo>

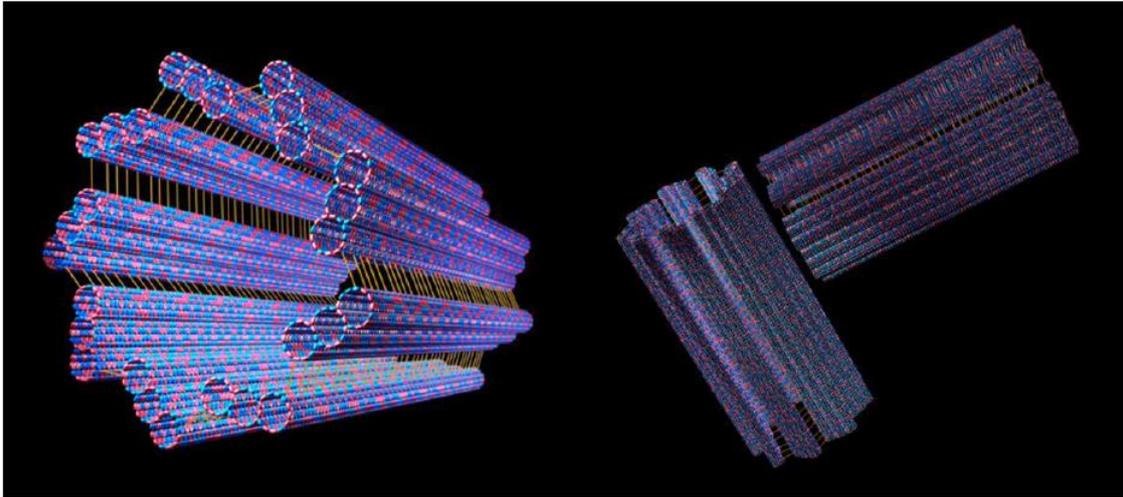


Fig 7 (a) Desarrollo gráfico en 3D de un cilindro que conforma un centriolo. (b) Desarrollo gráfico en 3D de la disposición perpendicular de los dos cilindros seccionados que conforman el centriolo. El núcleo interior del cilindro es de aproximadamente 140 nanómetros de diámetro y el cilindro es de 750 nanómetros de longitud. Ilustraciones de Biomedical Communications. Web & Graphics. Arizona Health Sciences Center.

Comenta Albrecht-Buehler que la óptica celular no puede parecerse a la efectuada por los ojos de los organismos conocidos en el mundo macroscópico. Por ejemplo, los ojos celulares no pueden no utilizan lentes, debido a que el tamaño de una célula típica es de aproximadamente 10 micras. Obviamente, tales lentes tendrían que ser mucho más pequeñas que la propia célula. Por lo tanto, vamos a suponer que el diámetro de la lente es de  $1\ \mu\text{m}$ . Las lentes solo pueden enfocar la luz cuya longitud de onda es menor que alrededor de  $1/1.000$  de su diámetro. De lo contrario, la luz simplemente se difractaalrededor de la lente y la ignora. En otras palabras, las lentes celulares sólo pueden funcionar con la luz cuya longitud de onda sea menor que  $1/1000\ \mu\text{m} = 1\ \text{nm}$ , es decir, con rayos-X. Esto significa que no hay materiales de los que para esmerilar lentes celulares porque no existen materiales que sean capaces de refractar los rayos X en cualquier medida.

Consideremos una fuente de señal (por ejemplo, fuente de la luz o cualquier otra cosa que se propaga a lo largo de líneas rectas, y vamos a diseñar el ojo ideal para ello). Por supuesto, esto no es como evolucionaron los centriolos y su funciones. De hecho, no tenemos idea de cómo evolucionaron. Sin embargo Albrecht-Buehler intenta mostrar metodológicamente de que una estructura puede tener una función determinada, si el lector se imagina a sí mismo ser un ingeniero teniendo en mente esa función en particular, habría terminado construyendo la misma estructura<sup>184</sup>. De hecho, Albrecht-Buehler demostró que si la luz infrarroja afectaba a la motilidad de las células, debía ser porque había una transmisión de señales desde el centrosoma a la pared celular para la

<sup>184</sup> Se ha de recalcar que Albrecht-Buehler no es partidario del concepto del diseño inteligente tal como lo defiende William Dembsky y Michael Behe. Empero, hay más afinidad a un diseño autoorganizado, una habilitación del organismo frente un Umwelt que evoluciona y que está defendido por Stuart Kauffman y colegas versus una teleonomía ciega descrita por Monod y defendida por Richard Dawkins.

disposición al desplazamiento. Ahora bien, parece ser que ni los microtúbulos ni un agente que cause de forma indirecta la transmisión de las señales, como podría ser por ejemplo el nocodazol<sup>185</sup>, son sensibles a la luz infrarroja. Si los pulsos de luz desestabilizan los microtúbulos que tenía que ser un efecto indirecto causado por algún otro componente celular que es sensible a la luz y conectado a los microtúbulos. En base a los datos anteriores, este componente tenía que estar con la pareja de centríolos incrustados dentro del centrosoma. En otras palabras, después de recibir los impulsos de luz el centrosoma desestabiliza la matriz radial de microtúbulos que corren hacia la corteza celular que, a su vez, posteriormente se extiende como pseudópodos hacia las fuentes de luz. Por lo tanto, parece que la desestabilización observada es la señal que se propaga a lo largo de los microtúbulos como si fuera a lo largo de los nervios. La situación tiene la reminiscencia de los nervios que conectan el cerebro (centrosoma) a un conjunto de músculos (microplastos) (Albrecht-Buehler 1980, 1998; Fulton 1984)<sup>186</sup>.

### **El fenómeno de la tensegridad y la mecanotransducción**

Siguiendo con las estructuras microtubulares de los citoplasmas celulares, una de las características biofísicas que más han llamado la atención es la capacidad sintética de adaptar a una célula de las condiciones estables en el espacio, bajo una óptima elasticidad y firmeza a la vez, o lo que es lo mismo, una amortiguación a las tensiones que permite mantener la integridad morfológica y fisiológica de la célula. A esto se le llama “tensegridad celular”.

El fenómeno de la tensegridad es fundamental para comprender la estabilidad estructural de la morfología celular tanto individual como colectiva (sobre todo en la medida del contacto háptico de una forma armónica y sus umbrales de compresión y tensión de tejidos). Pero también lo es para el desarrollo dinámico de motilidad celular donde las células pueden tener giros rotatorios en sus desplazamientos y su tensegridad está íntimamente relacionada con la elasticidad y viscosidad citoplasmática. Este es un clarísimo ejemplo de teleomecanismo donde la arquitectura citoesquelética de tensiones integrales están construídas y distribuidas con un objetivo claro de preservar en el ser more spinozista a la célula, en la recuperación de su forma y en la resiliencia estructural. Este es un claro ejemplo de una causa final como funcional en relación a las causas formales. Tal como expresa Timothy Lenoir, “el funcionalismo es una forma de teleología que invoca las finalidades funcionales de los agentes. Los requisitos funcionales establecen condiciones límite con las cuales las leyes fisicoquímicas están

---

<sup>185</sup> El Nocodazol es un agente anti-neoplásico que ejerce su efecto en las células al interferir con la polimerización de microtúbulos. El Nocodazol se utiliza frecuentemente en los laboratorios de biología celular para sincronizar el ciclo de división celular. Es un derivado de la benzimidazol que fue desarrollado como una potente droga anticáncer por ser un inhibidor de la mitosis, y por tanto de la actividad de los centríolos.

<sup>186</sup> Albrecht-Buehler, G. (1980) *Autonomous movements of cytoplasmic fragments*. Proceedings of the National Academy of Sciences Vol. 77, No. 11, pp. 6639-6643  
Albrecht-Buehler, G. (1998) *Altered drug resistance of microtubules in cells exposed to infrared light pulses: Are Microtubules the 'Nerves' of Cells?* Cell Motility and the Cytoskeleton. N° 40. pp. 183-192.  
Fulton, A. B. (1984) *The cytoskeleton: cellular architecture and choreography*. Chapman and Hall. N. Y., p. 56.

siendo aplicadas (...) Las finalidades de la vida establecen un marco jerárquico de principios de orden en los cuales operan las fuerzas fisicoquímicas”<sup>187</sup>. Dicho principio de orden es coherente con el desarrollo modular de la tensegridad, obra de ingeniería de complejidad irreductible por su funcionalismo. De hecho, el funcionalismo no deja de ser una forma de evidencialismo o una expresión fundamental de la evidencia operativa, estabilizada tanto filogenéticamente como ontogenéticamente a través de la selección natural y su desarrollo adaptativo. Pero tampoco se desdeña la *conformidad a un plan* como diría Uexküll. Un plan funcional, que conforma un Bauplan, una arquitectura celular gracias a ciertos genes homeobox implicados en la regulación del desarrollo (morfogénesis) de los animales. (Edelman 1992).

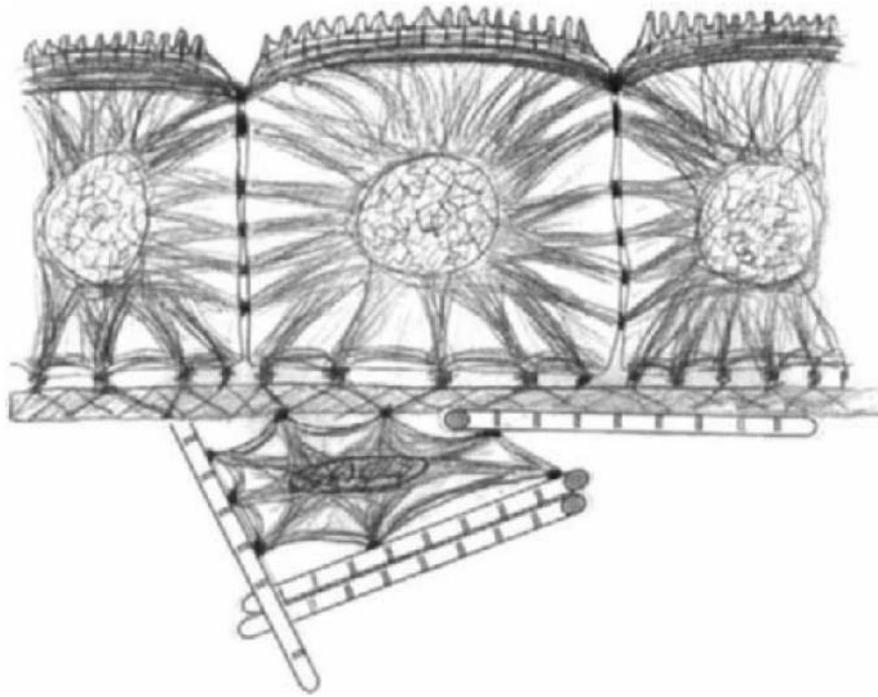


Fig. 8. Citoesqueleto extendido. Los citoesqueletos intracelulares de epitelio vecino y las células mesenquimales se conectan físicamente a través de uniones célula-célula y contactos adhesivos a una membrana andamio basal común. Este continuo estructural debe ser remodelado continuamente para que la morfogénesis proceda. Esta representación dibujada a mano muestra la apariencia del citoesqueleto extendido después de eliminar todas las membranas y las proteínas solubles. Esta es una muestra del control de presión del contacto háptico a través de la mecanotransducción (Fuente: Ingber 2003a).

Una estructura constituye un sistema de tensegridad si se encuentra en un estado de autoequilibrio estable, formado por elementos que soportan compresión y elementos que soportan tracción. Los elementos de compresión intracelulares son, en principio, los microtúbulos —polímeros de dímeros de tubulina—; mientras que los elementos de tensión son, ante todo, microfilamentos de actina y filamentos intermedios.

<sup>187</sup> Lenoir, T. (1982) *The Strategy of Life: Teleology and Mechanics in Nineteenth-Century German Biology*. University of Chicago Press. pp. 9-10.

Los orígenes de la tensegridad vienen de ciertas esculturas realizadas por Kenneth Snelson, donde se presentaba por primera vez estructuras tensionadas pero flexibles que no perdían su estabilidad. Snelson fue a enseñar estas estructuras a su mentor el polifacético y aún no famoso Richard Buckminster Fuller, quién incorporó de inmediato el hallazgo de Snelson una pieza central de su sistema de sinérgica, y, en ese proceso, se referiría a los nuevos objetos en términos de “mis estructuras” (Buckminster Fuller, 1965; García Barreno, 2009)<sup>188</sup>. En el proceso de apropiación, Fuller acuñó la denominación por la que hoy se conocen y que hace referencia a su propiedad de integrar la tensión de la estructura confiriéndola estabilidad. El término tensegrity — tensegridad— se forma a partir de “tensional integrity”: integración tensional o tensión integrada (Buckminster Fuller, 1961).

Pero fue en 1983 que un estudiante de doctorado en la Universidad de Yale llamado Donald Ingber<sup>189</sup> estaba trabajando sobre la biología de la formación de tumores y la invasión maligna cuando se le ocurrió aplicar las estructuras con tensegridad en su desarrollo de investigación.

Además de continuar sus investigaciones en biología celular, Ingber comenzó a observar algunas similitudes fundamentales entre los temas de sus dos aparentemente investigaciones opuestas. Al parecer, la teoría de la tensegridad era aplicable a los sistemas biológicos; es decir, las estructuras de Fuller exhibieron ciertas características dinámicas que eran análogas a las células y al comportamiento de los tejidos. Dichos

---

<sup>188</sup> Buckminster Fuller fue quien exploró por primera vez el uso de esta forma de estabilización estructural ya en 1927 en su plan para la casa Dymaxion Wichita, que minimizó el peso mediante la separación de los miembros de compresión de elementos de tensión. Para crear este edificio cilíndrico, Fuller propuso establecer un mástil central en la tierra como un puntal de compresión vertical y suspender de ella múltiples plantas circulares (ruedas horizontales) usando los cables de tensión. Cables tensores de tracción que unían el mástil a las anclas de los alrededores en el suelo siempre que la tensión de equilibrio necesario para estabilizar la estructura entera. Fuller llamó a este sistema especial discontinua-compresión, continua tensión, la “tensegridad” para enfatizar qué se diferencia de los sistemas arquitectónicos convencionales (por ejemplo, el tipo de construcción ladrillo sobre ladrillo), que depende de la compresión continua por su forma de estabilidad. Una definición más formal de Fuller la encontramos en su tratado, *Synergetics*, “La tensegridad describe un principio de relación estructural en el que la forma estructural está garantizada por un cierre finitamente y comprensiblemente continuo de conductas tensionales del sistema y no por las conductas de miembros de compresión discontinua y exclusivamente locales” (Fuller 1975, pp 372–434.). Tenga en cuenta que no hay ninguna mención de restricciones mecánicas, cuerdas elásticas, filamentos de tracción, internos vs. miembros externos o componentes moleculares específicos en esta definición. De hecho, Fuller describe un globo con las moléculas de gas no compresibles empujando contra una membrana de goma tensa como análoga a una de sus cúpulas geodésicas cuando se ve en el nivel microestructural (es decir, el globo es una red molecular porosa que se tensó en la microescala) y explica que ambas estructuras son ejemplos clásicos de estabilidad de la forma a través de la tensegridad. Fuller describió también las estructuras de tensegridad jerárquicas en las que los puntales individuales o elementos de tracción son a su vez las estructuras de tensegridad en menor escala; clave de este concepto es que las unidades más pequeñas de tensegridad requieren anclajes externos a otras unidades de tensegridad para mantener una estabilidad más alta orden. De hecho, argumentó que la naturaleza utiliza este sistema universal de estructuración a la tracción en todas las escalas de tamaño y que ofrece una manera de integrar mecánicamente parte y el todo (Ingber, Heidemann, Lamoureux, Buxbaum 2000).

<sup>189</sup> Ingber, D. E., Jamieson, J. D. (1995) *Cells as Tensegrity Structures. Architectural Regulation of Histodifferentiation by Physical Forces Transduced over Basement Membrane*. En: *Gene Expression During Normal and Malignant Differentiation*, (L. C. Anderson, C. G. Gahmberg, and P. Ekblom, eds.; Orlando, Fla.: Academic Press, 1985), pp. 13-32.

significativos paralelismos estructurales entre el comportamiento de los sistemas celulares y de tensegridad llevaron Ingber de ideas de gran alcance sobre la regulación de la forma celular, la diferenciación y el crecimiento, y de ese modo se sugirió una estrategia para una mayor investigación. Ingber procedió a construir, probar y estudiar las estructuras de tensegridad en un esfuerzo para entender las implicaciones de su modelo propuesto, y estaba emocionado por los resultados de la comparación. Su revolucionario enfoque ha dado lugar a avances significativos en su investigación sobre la formación de cáncer, que ahora continúa en el Departamento de Cirujía Infantil de la Facultad de Medicina de la Universidad de Harvard. Sin una descripción detallada de la investigación de Ingber, todavía podemos aprovechar por el tema de su teoría de los radicales. Propone un enfoque de “sistema completo” en el que “la forma arquitectónica de un tejido puede servir por sí misma para coordinar y regular la forma, orientación, y el crecimiento de sus células individuales a través de la transmisión de las fuerzas físicas de tensión y compresión de una configuración tridimensional característica dada”.

Hay una conclusión muy apropiada proporcionada por Ingber en su carta de 1983 a Fuller:

“La belleza de la vida es, de nuevo, más que de la geometría con sus limitaciones espaciales como el único principio unificador. Es de interés señalar que, como se presenta en el documento de acompañamiento, el cáncer puede entonces ser visto como lo contrario de la vida como resultado de una ruptura de esta jerarquía geométrica de arreglos sinérgicos.”<sup>190</sup>

La discusión de Ingber está diseñada para presentar el proceso de organización de células y tejidos desde una perspectiva holística y estructural. Él propone que: 1) la arquitectura biológica se basa en un sistema coherente y tangible, y construible de la ingeniería estructural, 2) Esta forma de arquitectura es especial en que su integridad estructural depende predominantemente a las fuerzas de tracción, y 3) información posicional y el patrón de generación de fuerzas informativas son inherentes a este esquema arquitectónico en forma de fuerzas estructurales.

¿Qué nos atrae a nosotros del fenómeno de la tensegridad en nuestro discurso sobre las condiciones mínimas de cognición en los organismos celulares? El hecho de que exista una construcción de ingeniería estructural formando parte de la estructura del citoplasma celular nos da que pensar en una autoorganización estructural de las células de una complejidad irreductible, puesto que las estructuras mínimas de estabilidad testamental y de comprensión están sobre un umbral de coeficientes de elasticidad. Es decir, que si la disposición en el espacio de los microtúbulos y microfilamentos de actina se generan por cierta ingeniería genética natural y selectiva, muy poco probable es que se haya realizado por ensayo-error en una genética neutral, y que ha debido de existir una forma de almacenamiento de la información que resulta óptima para la estabilidad estructural de las componentes de tensión y de tracción que viven la células

---

<sup>190</sup> Extraído de una carta de Ingber a Buckminster Fuller, el 5 de abril de 1983.

en compañía de otras, sobretodo por contacto háptico. No pueden mantener una tensión superior a un umbral establecido por el equilibrio tensérgico de resiliencia morfológica. Por lo que la recuperación de la forma, libre de tensiones externas, es permitida por los equilibrios homeodinámicos y heterodinámicos con el entorno circundante de las células. Es muy probable, aunque no entraremos en este trabajo sobre su fundamento, esta tensegridad corresponde a lo que Stuart Kauffman (2003) denomina el “*adyacente posible*” en tanto que aporta a la célula un plus de horizonte en la estabilidad estructural de cada célula en el entorno que le corresponda. Por lo que es muy probable que podamos hablar del fenómeno de la tensegridad como una causalidad teleonómica que tiene un propósito funcional, es decir de causa funcional como condición de posibilidad de su autopoiesis enactiva estable.

Ahora bien, podemos decir sin ninguna duda, que esta condición adaptativa evolucionada a la perpetuidad de los sistemas celulares es una sinérgica. Amy Edmondson (1987) describe sinérgica en los términos más amplios, como “el estudio de la complejidad espacial, y como tal es una disciplina intrínsecamente integral”. En su estudio de doctorado, Cheryl Clark<sup>191</sup> sintetiza el alcance de la sinérgica como “el estudio de cómo funciona la naturaleza, de los patrones inherentes a la naturaleza, la geometría de las fuerzas ambientales que impactan en la humanidad”. Pero también hace referencia a la sinérgica o concepto de salida de un sistema no previsto por la simple suma de salidas de cada parte del sistema, o entropía negativa. En un estado dinámico en el que se combina la acción se ve favorecida por la diferencia de las acciones de los componentes individuales, por lo que la coordinación y cooperación de las conexiones de las partes para la dinámica de un todo son fundamentales para la supervivencia. Son lo que Hermann Haken (1987) denomina conductas sinérgicas. Pero en este caso estamos estudiando la autoorganización de super estructuras macromoleculares lineales interconectadas en red y coordinadas biofísicamente en el citoplasma celular.

Los filamentos del citoesqueleto tanto generan como resisten las cargas mecánicas, siendo en gran medida responsables de la capacidad de la célula para resistir la distorsión de la forma. Estos andamios también funcionan como pistas para el movimiento de los orgánulos, y se orientan de las enzimas y sustratos implicados en las reacciones bioquímicas que median funciones celulares críticas (Ingber 1993a). Por otra parte, las células responden a fuerzas mecánicas ya los cambios en la forma celular o de la estructura del citoesqueleto mediante la alteración de estas mismas actividades químicas.

Ingber, con el respaldo de evidencias circunstanciales, apoya la idea de que las células son estructuras de tensegridad pretensadas con puntales y cables moleculares internos (Ingber, 1993b). Por ejemplo, los estudios biofísicos con los microfilamentos y microtúbulos aislados revelaron que los primeros son mejores en resistencia a la tensión, mientras que los microtúbulos huecos con su mayor segundo momento de inercia son mucho más eficaces a resistir la compresión. Debido a su aumento de la

---

<sup>191</sup>Cheryl L. Clark (2001) 12 degrees of Freedom, Ph.D. Thesis.

rigidez (longitud de persistencia), los microtúbulos son rígidos y rectos cuando está en solución e incluso empujan a cabo extensiones de membrana largas cuando encerrado dentro de liposomas, mientras que los microfilamentos y los filamentos intermedios aislados están doblados o altamente enredados, respectivamente. Sin embargo, los microtúbulos a menudo parecen estar curvada en células vivas (Fig. 9A), mientras que los microfilamentos son casi siempre lineal (Fig. 9B). Esto es consistente con la regla de la ingeniería que la tensión se endereza y hebillas de compresión o curvas. Linealización de filamentos intermedios enredadas también se produce durante la propagación de células (Fig. 9C.) como resultado de la extensión hacia fuera de toda la red, que depende de la presencia de microtúbulos intactos; la tensión a base de actomiosina a la vez promueve hacia adentro la retracción de la red. De hecho, los estudios de ambas células cultivadas y tejidos enteros indican que la estabilidad de forma de la célula depende de un equilibrio entre los microtúbulos y microfilamentos contráctiles opuestas o filamentos intermedios.

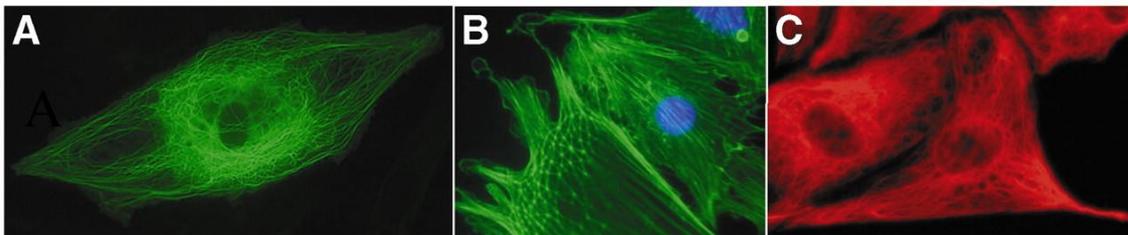


Fig. 9. Los microtúbulos, microfilamentos y los filamentos intermedios dentro del citoesqueleto de las células endoteliales visualizados con la tubulina GFP, faloidina rodaminada y los anticuerpos de vimentina, respectivamente. (A) Los microtúbulos (verde) abarcar grandes regiones del citoplasma y aparecen a menudo en forma curvada. (B) Los microfilamentos (verde-amarillo) aparecerá en forma lineal dentro de las fibras de estrés de largo y 'geodomos' (Fuller) triangulados de actina; la tinción en azul indica núcleos. (C) Los filamentos intermedios (rojo) aparecen dentro de una célula de difusión como una red reticulada que se extiende desde el núcleo hasta la periferia de la célula (Igber 2003a).

Teniendo en cuenta estas observaciones y el hallazgo de que las células ejercen fuerzas de tracción sobre su sustrato adhesivo en la Matriz Extra Celular (MEC)<sup>192</sup>, algunos investigadores fueron inicialmente receptivos al modelo de tensegridad, sin embargo, otros se mostraron escépticos<sup>193</sup>. A raíz de los argumentos a favor y en contra del modelo<sup>194</sup>, se ha hecho evidente que la validación experimental del modelo de tensegridad celular requiere demostración convincente de los tres principales comportamientos de las células vivas. En primer lugar, las células deben comportarse mecánicamente como redes discretas compuestas de diferentes filamentos del citoesqueleto interconectados y no como un (por ejemplo, viscoso o viscoelástico)

<sup>192</sup>Harris, A. K., Wild, P. and Stopak, D. (1980). *Silicone rubber substrata: a new wrinkle in the study of cell locomotion*. Science 208, 177-180.

<sup>193</sup>Brookes, M. (1999). *Hard cell, soft cell*. New Scientist 164, 41-46.

<sup>194</sup>Heidemann, S. R., Lamoureux, P. and Buxbaum, R. E. (2000). *Opposing views on tensegrity as a structural framework for understanding cell mechanics*. J. Appl. Physiol. 89, 1670-1678.

Ingber, D. E. (2000a). *Opposing views on tensegrity as a structural framework for understanding cell mechanics*. J. Appl. Physiol. 89, 1663-1670.

continuo mecánico. En segundo lugar, y más importante, el citoesqueleto pretensado debería ser un determinante importante de la deformabilidad celular. Y, por último, los microtúbulos deben funcionar como bielas de compresión y actuar de forma complementaria con las anclas de MCE para resistir fuerzas de tensión del citoesqueleto y, por lo tanto, establecer un equilibrio de fuerzas tensegridad en todo el nivel celular.

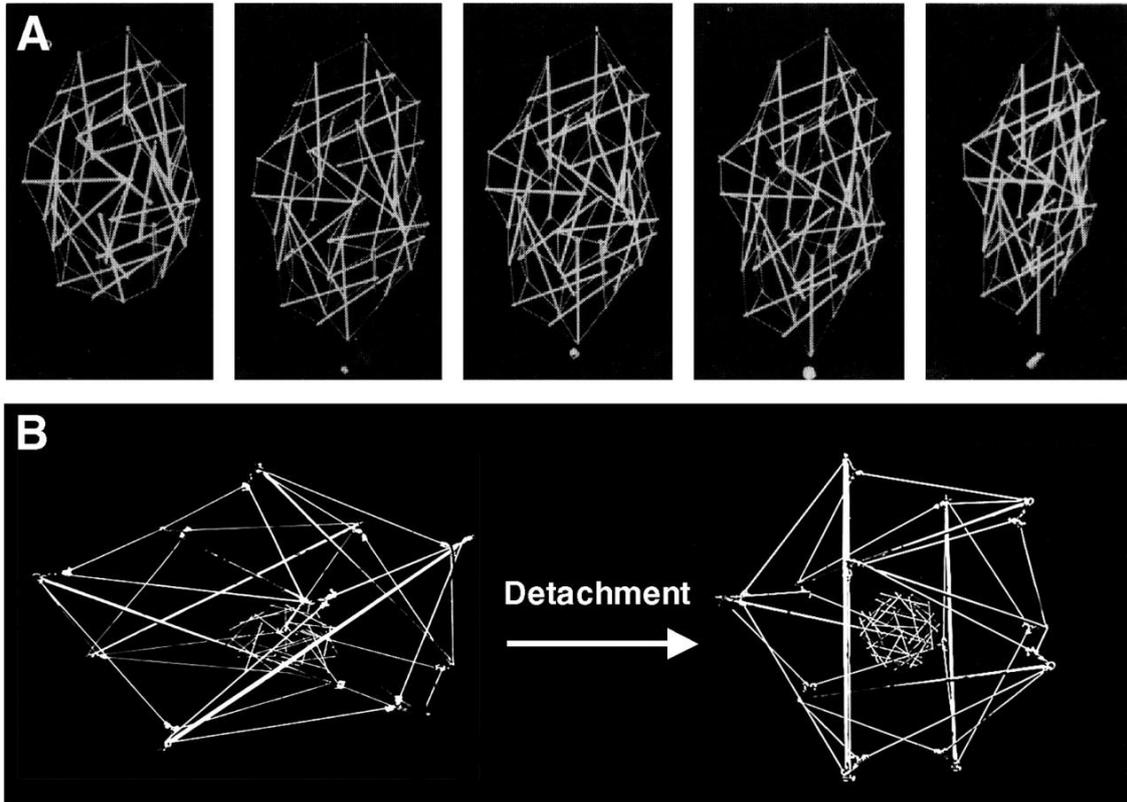


Fig. 10. Modelos celulares de tensegridad compuestas de palosycuerdas. (A) Un modelo fue suspendido desde arriba y cargado, de izquierda a derecha, con pesos de 0, 20, 50, 100 y 200 g. en un solo puntal en su extremo inferior. Tenga en cuenta que una tensión local induce arreglos estructurales globales. Reproducido con permiso de (Wang et al., 1993) American Association for the Advancement of Science. (B) Un modelo de tensegridad de una célula nucleada cuando adherente y se extendió sobre un sustrato rígido (izquierda) o separado y redondo (derecha). El modelo de célula se compone de puntales metálicos de gran tamaño y cuerda elástica; el núcleo contiene palos y cuerdas elásticas. En este modelo de celular, los grandes puntales representan conceptualmente microtúbulos; los cordones elásticos se corresponden con los microfilamentos y los filamentos intermedios que llevan a fuerzas de tensión en el citoesqueleto (Ingber 2003).

Si las células utilizan la tensegridad y el citoesqueleto se organiza como si fuera una tienda de campaña, entonces, si unova perturbar los microtúbulos (palos de la tienda), la fuerza que normalmente llevan sería transferido a los anclajes adheridos de la célula. Esta transferencia de fuerzas podría causar una mayor tracción en las adherencias de la célula (es decir, las estacas se tira hacia arriba y más cerca, y la rama de un árbol se arrancaron hacia abajo) (Fig. 11B). Por el contrario, si todos los filamentos del citoesqueleto experimentan tensión, como un montón de bandas elásticas tensadas, a continuación, si unoquisiera romper cualquiera de los filamentos, la tensión sobre el

sustrato se dispararía rápidamente (como una rama de un árbol salta hacia atrás hasta su posición inicial). Es importante destacar que, muchos experimentos han demostrado que cuando los microfilamentos de actina o filamentos intermedios – los elementos de tensión en el modelo – se rompen químicamente, las fuerzas ejercidas sobre traccionales de células adheridas a la matriz extracelular disminuye.

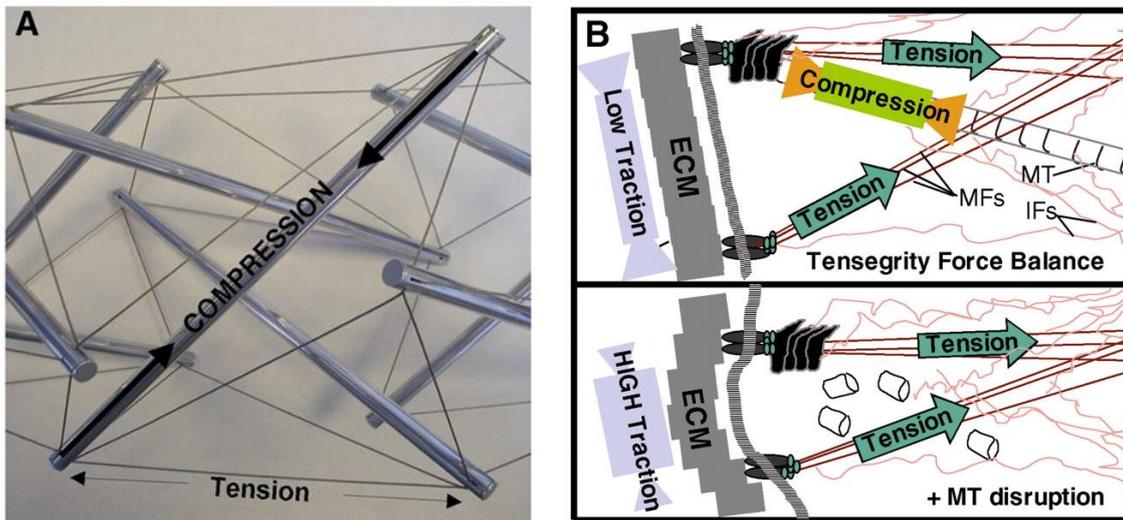


Fig. 11. (A) Una vista de gran aumento de una escultura de Snelson con elementos de compresión de la muestra y de tensión etiquetados para visualizar el equilibrio de fuerzas tensegridad basado en compresión local y la tensión continúa. (B) Un diagrama esquemático del equilibrio de fuerzas complementaria entre los microfilamentos tensos (MFS), filamentos intermedios (IFs), los microtúbulos comprimido (MTs) y el ECM en una región de una matriz de tensegridad celular. Las fuerzas de compresión soportados por microtúbulos (parte superior) se transfieren a las adherencias de la ECM cuando se interrumpen los microtúbulos (parte inferior), haciendo que aumente la tracción sustrato.

Para este modelo utilizaremos el módulo de Young (o módulo de elasticidad: relación entre la fuerza por unidad de superficie que actúa sobre un cuerpo y la deformación relativa que produce) para el citoesqueleto de actina, y que viene dado por la relación:  $E^* = CE\Phi^2$ ; [ $C$ = constante,  $\sim 1$  para diferentes materiales esponjosos;  $E$ = módulo de Young de un filamento individual de actina;  $\Phi$ = relación entre las densidades de las masas del entramado de filamentos de actina ( $\rho^*$ ) y un filamento individual de actina ( $\rho$ ),  $\Phi = \rho^*/\rho$ ]. El valor encontrado, tras introducir las medidas obtenidas experimentalmente, es:  $E^* \sim 10^4$  Pa, una cuantía que se ubica en el rango medio de los valores obtenidos experimentalmente (Garcia 2009).

En este modelolos filamentos de actina del citoesqueleto juegan el papel de cables que nopandean ni se acortan durante la deformación de la célula. La tensión inicial tieneun componente activo y dependiente de ATP a través del aparato de actomiosina,y otro pasivo dependiente de la presión osmótica del citoplasma (turgencia) y de la fijaciónde la célula a su basamento. Esta tensión está compensada por otras estructuras intracelulares (por ej. microtúbulos) y por fuerzas de reacción de la matriz extracelular a través de las placas de adhesión.El preestrés de la red de cablestensados puede definirse

como la fuerza total transmitida por los cables a través de un área seccional transversal, por unidad de área, en dirección normal al área.

Todo ello lleva a considerar – expresa García Barreno – cómo las vías moleculares de transducción de señales funcionan en el contexto físico de las células y los tejidos; o cómo una fuerza física —un estrés mecánico aplicado a la MEC o una distorsión celular— cambia las actividades químicas celulares o controla la dinámica tisular. La contestación hay que buscarla en la biofísica molecular; pero sin dejar de lado una perspectiva arquitectónica que asume interacciones multimoleculares jerarquizadas como hemos visto en la Figura 10.

El modelo que considera la naturaleza discreta del citoesqueleto, frente a la interpretación de una mecánica celular sobre la base de una mecánica continua, permite interpretar las deformaciones y distorsiones celulares a partir de los primeros principios de la mecánica. El citoesqueleto se extiende desde la membrana celular al núcleo, asegurando una estabilidad celular sobre la base de un balance entre la tensión generada en los microfilamentos contráctiles y la compresión resistida por los microtúbulos. Ahora bien, ¿dónde están los elementos de compresión? La respuesta depende de la escala de tamaño y el nivel jerárquico que se examina. Ingber (2003a) asegura que desde el punto de vista fisiológico, el nivel más relevante se refiere a cómo la célula controla su forma y estructura dentro de los tejidos vivos. Cuando las células están enzimáticamente desalojadas de los tejidos, espontáneamente redondean y pierden sus formas características. En otras palabras, las células no pueden estabilizar sus formas especializadas en ausencia de sus adherencias con la MEC. Por lo tanto, uno no puede definir los factores determinantes de la estabilidad de la forma celular en las células dependientes de anclaje sin tener en cuenta la mecánica del sustrato de adhesión, de la misma manera que uno no puede describir la estabilidad de una tela de araña, sin considerar las ramas de los árboles a la que está anclada.

Por lo que hemos visto hasta el momento, Ingber describe un modelo mecánico de la estructura celular basada en la arquitectura de tensegridad que explica cómo el comportamiento mecánico de la célula emerge de las interacciones físicas entre los distintos sistemas de filamentos moleculares que forman el citoesqueleto. Un trabajo reciente muestra que el citoesqueleto también orienta gran parte de la maquinaria metabólica, de la transducción de señales y la distorsión mecánica de las células. En particular, las variaciones graduales en este único parámetro de control físico (distorsión de la forma celular) pueden cambiar entre células diferentes programas de genes (por ejemplo, crecimiento, diferenciación y apoptosis), y este proceso puede ser visto como una transición de fase biológica (Ingber 2003b).

En nuestro desarrollo nos interesamos no tan solo en el *bauplan* citoesquelético, cuya anatomía intracelular es una obra de ingeniería compleja autoorganizada, también nos importa mucho que la epistemología de la investigación en biología de sistemas revela una “ingeniería inversa” al sistema de modelado computacional. Es decir, que en vez de reconstruir el desarrollo en una dinámica “bottom-up”, se ha demostrado que la jerarquía

de sistemas en la composición celular está compuesta de sistemas dentro de sistemas exhibiendo una inter-independencia de sistemas y de comportamientos totalmente robustos, persistentes a la variabilidad de la adaptación mecánica y de la estabilidad de la forma. Esto se podría decir a nivel de “hardware” del organismo celular. También nos recuerda la cita de René Thom cuando en su desarrollo de la estabilidad estructural y la morfogénesis, hace referencia a la reflexión que Uexküll (1942, pp. 54-55) establece cuando diferencia entre el mecanismo de un reloj, que está construido de una manera centrípeta, mientras que el crecimiento de un animal está siempre organizado de manera centrífuga. El desarrollo constructivo de la tensegridad celular revela entonces una construcción de sistemas en sentido “bottom-up” (a través del crecimiento y polimerización de los microtúbulos con las proteínas asociadas a los MTs, y las conexiones de los microfilamentos de actina), mientras que el desarrollo funcional se describe a través de sistemas “top-down” de las compresiones y las tensiones generadas desde la MEC. Por lo que podemos llegar a la conclusión que el comportamiento de regulación tensiométrica de las células funciona con la destreza semejante a la que se afina una cuerda de guitarra para que dé el tono perfecto, sin aflojar demasiado la cuerda ni tivarla por encima del umbral de resistencia para que no se rompa.

Un ejemplo perfecto de esta regulación tensiométrica fue estudiada en el comportamiento de los ciclos de contracción y relajación de nuestro *Physarum polycephalum* estudiando la relación con la morfología de los microfilamentos (Nagai, Yoshimoto y Kamiya 1978), tan importantes para la motilidad del plasmodio y la conducción locomotora bajo las recepciones de las señales del entorno.

En relación con las conclusiones de Nagai y colegas, Ingber (1993) revela que en las células vivas, ciertos acortamientos de microfilamentos contráctiles entre las adherencias fijadas a la MEC genera una tensión isométrica que induce a la agrupación microfilamentos (Isenberg y Wohlfarth-Botterman, 1976), y por lo tanto produce la formación de fibras de tensión "lineal" que se alinean a lo largo de las líneas de campo de tensión. Mas los microfilamentos que no se fijan en la MEC, en vez de despolimerizarse, se dispersan de forma individual al no estabilizarse por la tensión isométrica y pasan a incorporarse a la formación de redes de escasos micrómetros detrás del borde de la matriz. Es decir los microfilamentos se autoorganizan para formar parte o de una tensión isométrica que permita la estabilidad morfológica del plasmodio o, como veremos en la segunda parte de nuestro trabajo, forman parte de la contracción y relajación cíclica que permite la motilidad del *Physarum polycephalum* que, aunque Nagai y Kamiya no encuentran evidencias para esta afirmación, las tendremos confirmadas con Mitsuo Ishigami (1986a, 1986b, 1987, 1990) sobretodo a través de los cambios cíclicos del patrón de agregación de los microfilamentos en forma de F-actina.

Para la migración celular, como vemos, están implicados mecanismos de tensión y comprensión que permiten los movimientos oscilatorios, imprescindibles para el desplazamiento. Pero el interés en moverse la ameba reside en ciertas taxis o respuesta sensible hacia uno o diferentes estímulos como por ejemplo a los gradientes químicos (quimiotaxis), o a la temperatura (termotaxis), o la luz (fototaxis), o a la gravedad

(gravitotaxis), o al contacto (haptotaxis), o a las corrientes eléctricas (galvanotaxis) entre muchas otras respuestas. Algunas de ellas, como la fototaxis las hemos estudiado anteriormente. La importancia en este desarrollo es la interrelación entre una respuesta a un estímulo y su tensesidad dinámica. Es decir, cómo responde la estabilidad estructural de forma dinámica en la recepción sensible de una célula, por ejemplo, en la recepción háptica o de contacto. Cual será el umbral de elasticidad que la célula puede resistir sin que se destruya la integridad celular, su membrana. Todo este sistema de señales comunicadas para percibir el entorno exterior y obtener una significación determinada para dar respuesta a los estímulos, está fundamentado por la mecanotransducción.

La mecanotransducción es el proceso que transforma un estímulo mecánico en una señal bioquímica, permitiendo la adaptación al medioambiente para la supervivencia de la célula. Dicha transducción de señales se produce a través de una distorsión membranar, lo que condujo a la búsqueda de componentes de la membrana que pudieran mediar tal conversión mecanoquímica, y ello permitió identificar canales iónicos mecanosensibles que se disponen ubicuamente en la membrana celular. Los canales mecanosensibles, como los que se encuentran en los corpúsculos de Pacini, se abren por el estiramiento que sufre la membrana celular ante la aplicación de presión y/o tensión. El mecanismo sensor en esta clase de canales no se ha esclarecido del todo, sin embargo, se ha propuesto que los ácidos grasos de la membrana actúan como los agentes sensores mediante la activación de fosfolipasas unidas a la membrana o bien se ha propuesto que participa el citoesqueleto que se encuentra inmediatamente por debajo del canal. Al igual que los receptores sensoriales específicamente nerviosos, los organismos unicelulares también tienen dicho tipos de receptores, cuyas características fisicoquímicas son: la excitabilidad, la especificidad, la adaptabilidad y la codificabilidad. En todas las células mecanosensibles que no son especializadas el citoesqueleto es el protagonista de la mecanotransducción y, por tanto, tienen dichas características producidas a través del preestrés tensional o tensión isométrica de la célula.

A través de la superficie celular los receptores de integrina (una glicoproteína, fundamental para los puentes célula-célula) pueden afectar profundamente el comportamiento celular, puesto que son verdaderos sensores de la MEC al realizar conexiones transmembranares con el citoesqueleto, activando numerosas vías de señales intracelulares en un proceso que exige la participación de diferentes colaboradores.

Són funcionalmente receptores de membrana que permiten el anclaje de la célula a la matriz extracelular. Esto es fundamental para los metazoos, por su estructura multicelular donde estos anclajes son fundamentales. Las integrinas no son simples garfios, sino que transmiten numerosas señales críticas sobre el entorno que rodea a la célula. Junto con la señales recibidas por los receptores celulares para factores de

crecimiento solubles como VEGF (Factor de crecimiento endotelial vascular)<sup>195</sup> o EGF (Factor de crecimiento epidérmico)<sup>196</sup>, refuerzan la capacidad de la célula a la hora de tomar decisiones biológicas: moverse, ser anclada, morir, diferenciarse, etc. Por ello, las integrinas se encuentran en el centro de multitud de procesos biológicos.

Por otro lado, los protistas, las amebas y los mixomicetos carecen de integrinas. Ahora bien en el caso de los pseudoplasmodios como el *Dictyostelium discoideum*, donde existe una aglutinación multicelular, a diferencia de los mixomicetos plasmodios que son unicelulares polinucleados, se descubrió un receptor similar a la integrina denominado Sib (del grupo de Sib, el más representativo es el SibA) (Cornillon et al. 2006) que se asemeja funcionalmente a los mecanismos de adhesión de las células de mamífero. Pero también son muy importantes para la adhesión de las células destinadas a realizar el cuerpo fructífero donde se depositan las esporas del *Dictyostelium* en un comportamiento cooperativo, donde múltiple número de células son autodestinadas a morir para la generación del tallo. Esto lo veremos en la segunda parte del trabajo, pero es remarcable que los receptores mecanosensores de los mixomicetos son los propiciadores de la morfología funcionalidad del ciclo vital, generando una tensegridad pluricelular en el tallo del cuerpo fructífero, aparte de la propia tensegridad intracelular de cada ladrillo que lo genera.

Como vemos, el desarrollo de la mecanotransducción bioquímica está íntimamente ligado a la tensegridad biofísica. Los mecanismos de adhesión entre células conforman tejidos celulares (epitelios por ejemplo en metazoos, o tallos de cuerpo fructífero en mixomicetos) y generan una tensegridad de un orden complejo superior, hasta llegar a los comportamientos de tensegridad ósea en los vertebrados. ¿Pero que relación tiene todo esto con la condición de posibilidad de la cognición?

La existencia sinérgica de la tensegridad celular ofrece un fundamento teleológico de conformidad a un plan de estabilidad estructural, cuya receta genética (Heidel, A. J., et al 2011) es la causa motriz o eficiente principal de su desarrollo constructivo (causa material) entre tubulinas para constituir microtúbulos, o entre actinas para formar microfilamentos, y así ofrecer una perfecta interrelación entre la tensión y la compresión en un equilibrio estructural estable (causa formal) y permitir tanto la máxima expansión homeodinámica de cada célula; como también la mecanotransducción de señales para el

---

<sup>195</sup> El factor de crecimiento endotelial vascular (VEGF, por Vascular Endothelial Growth Factor) es una proteína señalizadora implicada en la vasculogénesis (formación de novo del sistema circulatorio embrionario) y en la angiogénesis (crecimiento de vasos sanguíneos provenientes de vasos preexistentes). Como su propio nombre indica, las acciones del VEGF han sido estudiadas en las células del endotelio vascular, aunque también tiene efectos sobre otros tipos celulares (por ejemplo, estimula la migración de monocitos/macrófagos, neuronas, células epiteliales renales y células tumorales). In vitro, se ha demostrado que el VEGF estimula la división y la migración de células endoteliales. El VEGF también es un vasodilatador e incrementa la permeabilidad vascular; originalmente recibía el nombre de factor de permeabilidad vascular (vascular permeability factor) (Fuente de información: Wikipedia®). La estimulación de la migración de macrófagos, como pueden ser las microglías, por ejemplo son de alto interés para la comparativa funcional fagocitadora de los mixomicetos, a través de la quimiotaxis para estudios posteriores a este trabajo.

<sup>196</sup> Sustancia de naturaleza proteica que junto con las hormonas y los neurotransmisores desempeñan una importante función en la comunicación intercelular (fuente de información: Wikipedia®).

intercambio de información con el entorno, permitiendo la motilidad autoconducida por los receptores de señales que transfieren la atracción o repulsión quimiotáctica, por ejemplo (causa funcional o final).

El bauplan o modelo organizativo celular constituye la condición básica de la vida en tanto que puede haber replicación celular (o nuclear en el caso de plasmodios, sincitios o cenocitos), capacidad de nutrición y de supervivencia en un entorno de variabilidad caótica. La capacidad de intercambio de señales con el entorno es un dinamismo funcional de ciertos circuitos que son constituídos por la evolución de las especies y el desarrollo aportado por cada individuo en tanto que incrementa su capacidad de desenvolverse e ir superando constricciones y adversidades. Como veremos en el siguiente capítulo, la condición mínima de cognición depende de ciertos parámetros previos cuya posibilidad de presencia depende mucho de las causas funcionales que generan capacidades a los organismos vivos. Y el desarrollo de la tensegridad y la mecanotransducción son ciertamente parte imprescindible de la eficiencia funcional de las conductas adaptativas, cuya ingeniería celular conlleva un extraordinario y complejo nivel neguentrópico de máxima optimización estructural y de procesamiento del Umwelt y del Innenwelt del organismo.

Por eso nos importa el modo en que las redes estructurales intracelulares influyen en las redes de procesamiento de la información celular. Nos interesa estudiar la interconexión entre la morfodinámica del andamiaje del citoesqueleto, su estructura de tensegridad y la transducción de señales provenientes tanto de la MEC como del citoplasma. Todo lo que ocurre en este estadio repercute en el comportamiento motriz de la célula y en la toma de decisiones del organismo. Por eso debemos tener en cuenta cómo las vías de señalización moleculares funcionan en el contexto físico de las células.

Los sistemas sensoriales en los organismos complejos, metazoos, tienen receptores sensoriales específicos – como hemos visto con las integrinas – que interaccionan con las células nerviosas desarrollando circuitos funcionales entre el Umwelt y el Innenwelt. Pero en los organismos sencillos, protozoos, ameboides y bacterias, ese desarrollo no existe. Los sistemas de recepción y de transducción de señales conllevan a tener un circuito funcional diferente, puesto que intracelularmente no hay la conducción electroquímica que las células nerviosas tienen. Aunque veremos en la segunda parte de nuestro trabajo que los mixomicetos responden perfectamente a la conducción de estímulo eléctrico (Kamiya y Abe, 1950; Burr y Seifriz, 1955) No obstante, tanto las células procariotas como eucariotas tienen canales mecanosensitivos que permiten la transducción de señales, como he descrito anteriormente, y que gracias a ellos se intercambian informaciones del entorno con el mundo interno de los organismos. Diversos canales de iones sensibles al estiramiento, proteína quinasa C, quinasa de adhesión focal (FAK), proteína quinasa regulada por señal extracelular (ERK), Rho, proteínas G heterotrimericas y adenililciclase, pueden estar involucrados en la respuesta de señalización química que está provocada por un estímulo mecánico (Ingber, 1991; Ingber, 1997). Por otra parte, la mayoría de éstos son intracelulares, y hasta los canales iónicos que están expuestos en la membrana celular no parecen percibir las fuerzas

físicas en condiciones fisiológicas directamente. Algo parecido ocurre con el cAMP que interactúa extracelularmente como foco de adhesión multicelular del *Dictyostelium discoideum*, ofreciendo un torbellino regulado como un sistema de reacción-difusión BZ, como también intracelularmente, pues es un transductor de señales de segundo orden que permite la decodificación quimiotáctica y, como no, la suya propia en el Umwelt o campo de percepción significativo del entorno. Curiosamente en el *Physarum polycephalum*, dicho AMP cíclico se encuentra mediado por una proteína quinasa denominada actina-fragmina quinasa<sup>197</sup>, cuya secuencia no es homóloga a las proteínas quinasas de los eucariotes superiores, sin embargo su pliegue tridimensional revela un módulo catalítico de aproximadamente 160 residuos, en común con la superfamilia de la proteína quinasa eucariota. Dicha actina-fragmina quinasa es la responsable de la regulación de la formación de los microfilamentos de actina (Steinbacher et al., 1999) y, por lo tanto tiene relación directa dicha transducción de señales con la construcción de los factores de de comprensión en la tensegridad de los mixomicetos.

### **La actividad de la actina y la miosina**

Actualmente podemos también identificar otro agente que puede afectar como nervio en las células ameboidales en tanto que ofrece modificaciones tanto de la morfología del citoplasma (proceso de solución y gelación – o también denominado “sol-gel”<sup>198</sup>) como el transporte y la migración celular. Recordemos que el citoplasma es la parte de la célula comprendida entre la membrana y el núcleo. Está compuesto por el hialoplasma o citosol – constituido por un 85% de agua y diversas sustancias coloidales (prótidos, lípidos, glúcidos, etc.) y mitocondrias; y el citoesqueleto – formado por proteínas estructurales como las tubulinas que hemos visto anteriormente y actinas, entre otras.

---

<sup>197</sup> La fragmina es una proteína de la familia gelsolina, clave en el ensamblaje y desensamblaje de los filamentos de actina.

<sup>198</sup> Las propiedades coloidales de la célula, como las transformaciones básicas de Sol-Gel; de “Sol” (una Solución líquida del citosol más fluida) a “Gel” (un citosol más rígido, sólido y gelatinoso) son básicas para determinadas actividades básicas celulares como las modificaciones de la viscosidad y el movimiento intracelular del citoplasma en forma de *corrientes de fluido citosólico* (cyclosis o cellular streaming en inglés) o locomoción celular de tipo ameboides, la formación del huso mitótico y el clivaje (rotura) de la célula madre para dar lugar dos células hijas durante la fase de citocinesis de la división celular (mitosis), el crecimiento y formación sinápticas, y liberación de vesículas de neurotransmisores. Las transformaciones Sol-Gel, que pueden ocurrir rápidamente (aproximadamente 40 Sol-gel ciclos por segundo), dependen fundamentalmente de los componentes del citosol, y son causadas principalmente por las reacciones controladas de ensamblaje y desensamblaje (remodelamiento dinámico) de elementos del citoesqueleto (embebidos en el citosol) principalmente microfilamentos de actina y microtúbulos y de las asociaciones contractiles actina-miosina. [http://www.wikillerato.org/El\\_Citoplasma\\_y\\_el\\_Citosol.html](http://www.wikillerato.org/El_Citoplasma_y_el_Citosol.html)  
Casco, V. H. (2006) Citoplasma – Citosol – Citoesqueleto. [www.fca.uner.edu.ar/academicas/deptos/catedras/biologia/citoesqueleto\\_12.pdf](http://www.fca.uner.edu.ar/academicas/deptos/catedras/biologia/citoesqueleto_12.pdf)

Lodish H, Berk A, Zipursky S. L, et al. (2000) *Molecular Cell Biology*. 4th edition., New York: W. H. Freeman.

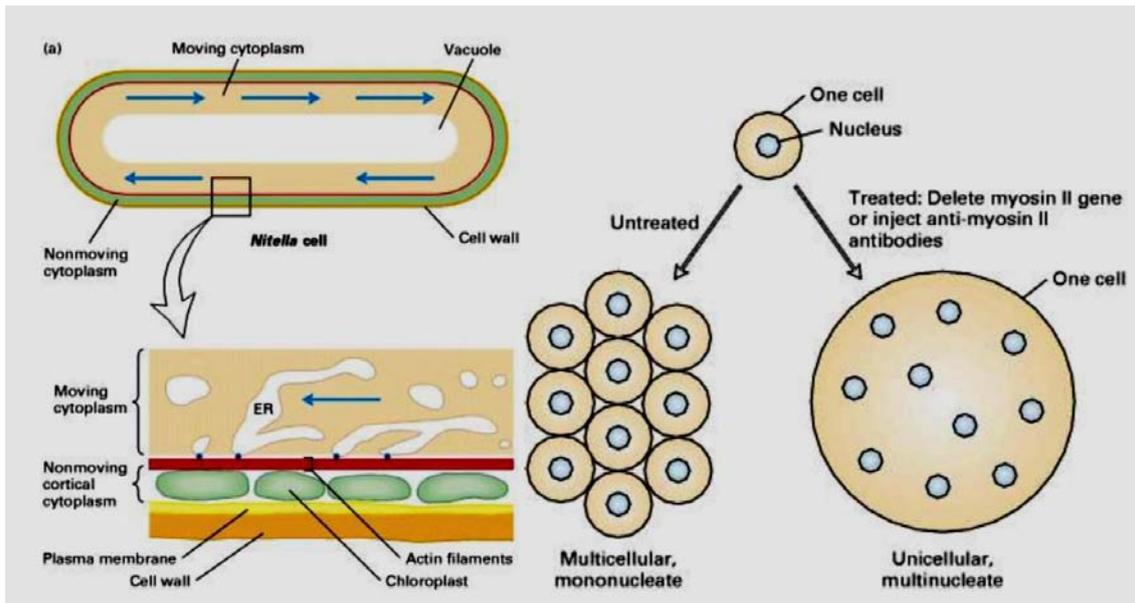


Fig. 12(a) y (b) La actina y la miosina en células no musculares tienen un papel importante en la citocinesis. Fig. 12(a) Corrientes citoplasmáticas de algas gigantes cilíndricas. (A) El centro de una célula de *Nitella* se llena con una sola vacuola llena de agua grande, que está rodeado por una capa de citoplasma en movimiento (indicado por flechas azules). Una capa no activa de citoplasma cortical lleno de cloroplastos se encuentra justo debajo de la membrana plasmática (figura inferior ampliada). En el lado interior de esta capa están estacionarias haces de actina en filamentos (rojo), todas orientadas con la misma polaridad. Una proteína motora de miosina (puntos azules) lleva porciones de la red de retículo endoplasmático (ER) a lo largo de los filamentos de actina. El movimiento de la red ER impulsa todo el citoplasma viscoso, incluyendo orgánulos que están inmersos en la red de ER. (B) Una micrografía electrónica del citoplasma cortical muestra una gran vesícula conectada a un paquete subyacente de los filamentos de actina. Esta vesícula, que es parte de la ER de la red de retículo endoplasmático, tiene contactos con los filamentos de actina estacionarios y se mueve a lo largo de ellos por un motor de miosina. Este flujo de corriente o streaming es semejante al estudiado en los mixomicetos. Fig. 12(b) Demostración experimental de que la miosina II se requiere para la citocinesis. La actividad de la miosina II se ha inhibido ya sea mediante la supresión de su gen o por microinyección de anticuerpos anti-miosina II en una célula. Una célula que carecía de miosina II fue capaz de replicar su ADN y núcleo, pero no para dividir; este defecto causó que la célula se convirtiera en grande y multinucleada (semejante a un mixomiceto plasmodio como el *Physarum polycephalum*). En comparación, una célula no tratada durante el mismo período continuó para dividir y formó una bola multicelular de células en las que cada celda contiene un solo núcleo (semejante a un mixomiceto pseudoplasmodio como el *Dictyostelium discoideum*). Fuente de las imágenes Lodish H, Berk A, Zipursky S. L, et al. (2000) *Molecular Cell Biology*. 4th edition., New York: W. H. Freeman.

La actina, al igual que la tubulina, es una proteína globular encargada de realizar el esqueleto celular, generando filamentos polimerizados. Su funcionalidad es, entre otras:

- Provocar la contracción de la célula (sea ameboide como muscular) a través de su asociación a la miosina (otra proteína fibrosa ATPasa que, al hidrolizar ATP, su reacción proporciona la contracción)

- La formación de pseudópodos, produciendo envaginaciones que permite la motilidad ameboidal, basada en la transición citoplasmática de sol a gel.
- Formar el soporte morfológico, pues ofrece rigidez a las microvellosidades.
- También la actina es fundamental para la elasticidad de las células.

Pero otro aspecto que lo fundamenta – como la tubulina – es la poca variación que ha tenido a lo largo de la evolución de la vida. En las fibras musculares confiere cerca del 20% del peso en proteína celular, mientras que en otros organismos oscila entre el 1 y el 5%. Todo y eso la importancia de su actividad es fundamental. En bacterias tiene su homólogo conocido como MreB, y en arqueas es el Ta0583 que es aún más similar a las actinias de eucariotas.

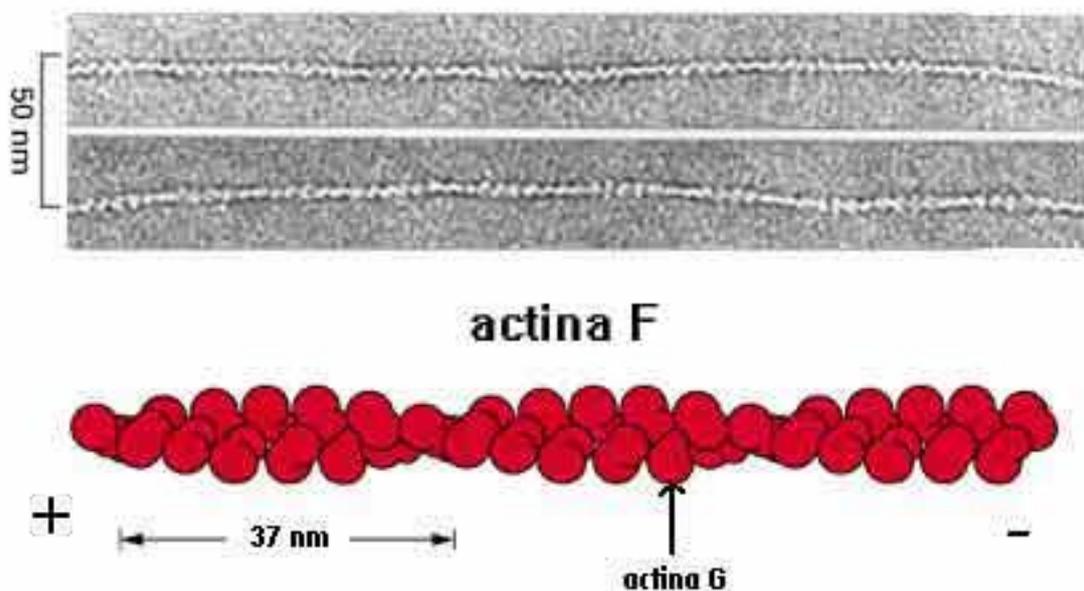


Fig. 13. Microfilamentos. La unidad básica del homopolímero es la actina G. Esta molécula posee la capacidad de interactuar con el ATP e hidrolizarlo. La estructura de los microfilamentos es parecida a dos cuerdas ligeramente apretadas compuestas por actina G, de manera que forman una especie de estructura helicoidal denominada actina F. Fuente imagen: <http://usuarios.multimania.es/bioteca3000/contenido/citologia/citoesqueleto.htm>

La miosina puede controlar la tensión interna y por lo tanto la elasticidad de las células. En efecto, la pérdida simultánea de múltiples clases de miosinas I y II en el mixomiceto *Dictyostelium discoideum* provocó una disminución de la tensión cortical, mientras que la sobreexpresión de miosinas de clase I aumentó la tensión cortical<sup>199</sup>.

El complejo filamentoso de la actina-miosina es el encargado de las coordinaciones de contracción y relajación de los filamentos y de los canales citoplasmáticos que lideran la locomoción, generando lo que más adelante Takamatsu, Nakagaki, y otros investigadores sobre la motilidad de los mixomicetos denominan “motiligencia” (*motiligence*). Estos están en contacto con los microtúbulos que comunican con los

<sup>199</sup> Dai, J. , Ting-Beall, H.P. , Hochmuth, R.M. , Sheetz, M.P., Titus, M.A. (1999) Myosin I contributes to the generation of resting cortical tension. *Biophysics Journal*. N° 77, pp. 1168–1176

centrosomas, distribuyéndose en paralelo tanto a los microtúbulos como éstos al eje longitudinal de la hebra protoplasmática del mixomiceto ameboidal (Naib-Majani, Stockem, Weber, Wehland, Wohlfarth-Bottermann 1983). En los plasmodios, dicha comunicación es múltiple debido a la naturaleza polinucleada de las amebas, por lo que los centrosomas han de estar coordinados en una sincronización mitótica. Pero también han de recibir las señales direccionales de contracción alineadas en mayor medida para la coordinación de las contracciones de cara a la unidireccionalidad o no de la motilidad del plasmodio.

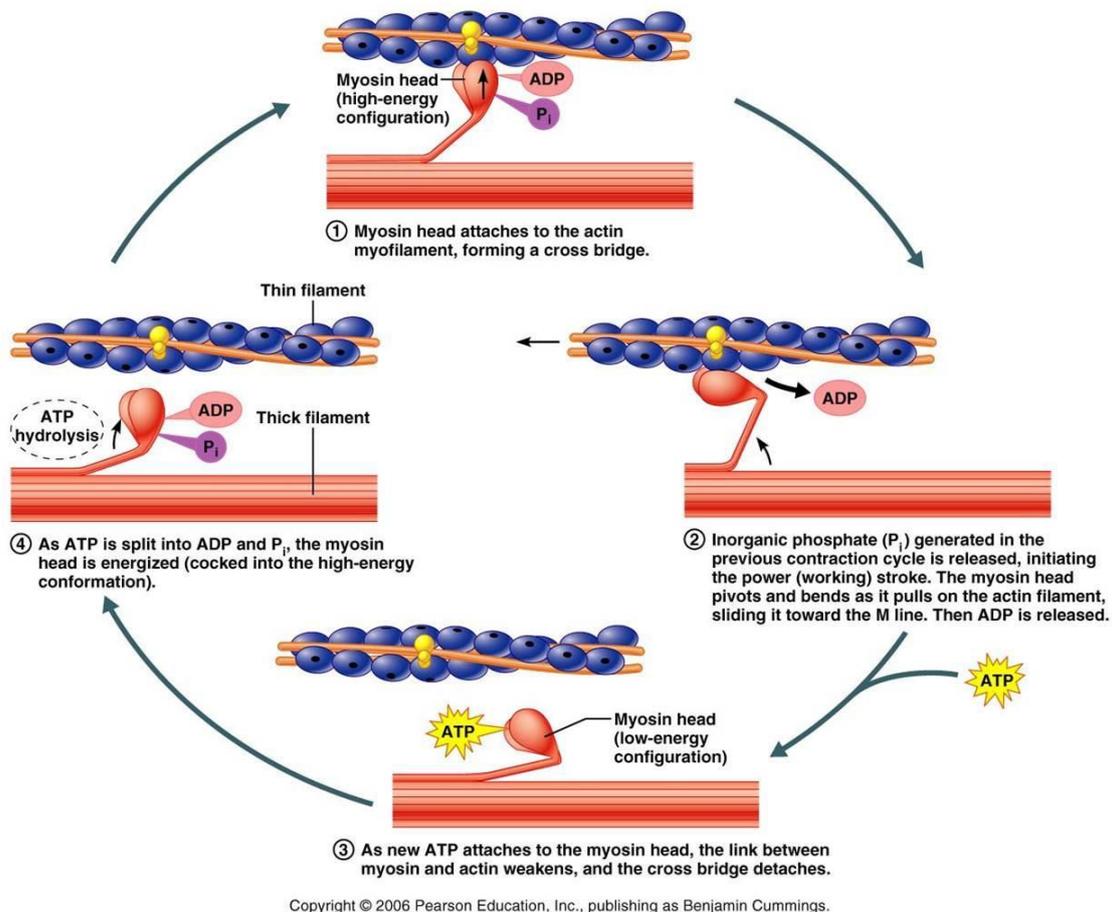


Fig 14. Durante la contracción los filamentos finos de actina se deslizan sobre el filamento grueso de la miosina. Cuando el calcio está presente la vía activa bloqueada de la actina se abre. Paso A: la cabeza de miosina se une a la actina. (Configuración de alta energía  $ADP + P$ ). Paso B: golpe energético: pivota la cabeza de miosina que tira de los filamentos de actina hacia el centro. Paso C: El puente de cruz se separa cuando un nuevo ATP se une a la miosina. Paso D: se produce una inclinación de la cabeza de la miosina cuando el ATP pasa a ser  $ADP + P$ , pudiendo formar otro puente de cruz. Fuente de imagen: Campbell, Simon, Reese and Dicky (2010) Biology. Pearson/Benjamin Cummings.

Estas señales de contracción vienen acompañadas de dos patrones fundamentales. Un patrón es el denominado “oscilación química”, efecto producido por los procesos de contracción del actomiosina. El segundo patrón que está unido a la actividad oscilatoria

del flujo de corriente o “streaming” del protoplasma es el de reacción-difusión, fundamentales para los procesos de concentración y de expansión bioquímicos (Rubinstein, Jacobson y Mogilner 2005; Tero, Kobayashi y Nakagaki 2005).<sup>200</sup> Esto es así debido a la necesidad de una alta viscosidad para la polimerización de la actina tanto en mixomicetos plasmodios – modelo *Physarum polycephalum* – (Hatano, Totsuka y Oosawa 1967) como en mixomicetos pseudoplasmodios – modelo *Dictyostelium discoideum* – (Yumura, Mori y Fukui 1984; Yumura y Fukui 1998; Vicker 2000), pudiéndose establecer también una identificación estructural comparativa entre los filamentos de actina muscular con la actina F de ambos pseudopodos (Zheleznaya, Gottberg, y Hatano 1971).

De hecho, el profesor Michael G. Vicker del departamento de Biología la Universidad de Bremen ha llegado a la conclusión de que “la propagación de la onda oscilatoria de la actina F también presta apoyo a la idea de que la auto-organización y la cinética no lineal son principios universales, inherentes y fundamentales de las células eucariotas, con posibles consecuencias para los conceptos de tiempo celular y el origen de algunas oscilaciones biológicas, y para el desarrollo de sistemas multicelulares” (Vicker 2002). Comenta que el comportamiento espacio-temporal claramente disipador de estas estructuras de malla de actina citoesquelética proporciona una evidencia potente de que el conjunto de filamentos de actina reversibles se propaga como una onda de reacción-difusión química auto-organizada.

Estos procesos oscilatorios que mencionamos en este capítulo del trabajo, y que describiremos con mayor detalle en la segunda parte, son parte fundamental de la descripción de la motilidad, de la interacción entre las unidades y de las condiciones de emergencia de una conducta adaptativa requerida para que dicha motilidad ofrezca parámetros mínimos de cognición en dichos organismos como coherencia oscilatoria, conducción, etc. (Takamatsu, Ito, Okamoto, Gomi, Arafune, Watanabe, Tero y Nakagaki 2009). Con esto no se está demostrando que sean en sí parámetros de cognición mínima, sino que en el conjunto de parámetros que conforman los principios mínimos irreductibles de cognición (Hanczyc y Ikegami 2010; Müller, di Primo y Lengeler 2000; Müller, di Primo y Lengeler 2001), la actividad oscilatoria de contracción de la actina F establece un parámetro indiscutiblemente necesario para la automotricidad del organismo, fundamental para la conformación de dichos principios mínimos cognitivos. Con ello cabe destacar el papel de las ondas de reacción-difusión para que pueda ser utilizado como controlador de un “animat” mínimamente cognitivo.

---

<sup>200</sup> Cabe destacar que uno de los primeros informes postula que los mecanismos no lineales de gelación de la actina-miosina es responsable de las ondas, mientras que otro informe propone un sistema de reacción-difusión bioquímica subyacente. Pero Tero y colegas (2005) demostraron que los patrones de oscilación espacio-temporales en ciertos experimentos con el mixomiceto plasmodio *Physarum polycephalum* pueden ser descritos en sistemas de ecuaciones de reacción-difusión de una y dos dimensiones, pudiendo así conservar la cantidad bajo la expresión del movimiento oscilatorio acoplado. Dicha conservación deriva del intercambio de sol entre la esponja y los tubos del plasmodio. Más adelante veremos la fisiología del plasmodio y comprenderemos las fases de intercambio establecidos para los movimientos rítmicos de contracción y motilidad ameboidal del pseudópodo.

¿Qué es un “animat”? Cualquier material no biológico o entidad que presenta el conjunto mínimo de conductas que definen una forma de vida es, de facto, un “animat”. Fue a través del artículo seminal del profesor Rodney Brooks “La inteligencia sin representación” (1991) que se hizo mención a la capacidad de estas vidas artificiales del aprendizaje independiente sobre su entorno a través de la aplicación y la evolución de las reglas de coincidencia de patrones llamados “taxones”.

### Sistemas de reacción-difusión

Fue Alan Turing quien en 1952 propuso para modelizar diversos procesos biológicos de formación de patrones un tipo de ecuaciones parabólicas en derivadas parciales<sup>201</sup> como “la base química de la morfogénesis”<sup>202</sup>. Dichas ecuaciones son los sistemas de reacción-difusión. Estas describen cómo una o más sustancias distribuidas en el espacio cambian bajo la influencia de dos procesos: una por reacciones químicas locales en las que las sustancias se transforman entre sí; y otra por la difusión provocada por la expansión en el espacio de las sustancias. Su resultado es un proceso de configuración estable en la que la composición química no es uniforme en el dominio espacial en el que interactúa.

En los sistemas químicos, las reacciones químicas son la fuente de los componentes moleculares y la difusión es el proceso físico clásico basado en el movimiento browniano. Sin embargo, en el caso del desarrollo de tejidos, tanto la reacción como la difusión son procesos mucho más complejos: la reacción implica la producción y el consumo de moléculas por parte de las células; el transporte a través de tejidos, aunque capaz de generar gradientes moleculares, es un proceso mucho más complejo que la simple difusión. De ahí que se haya propuesto el término "reacción-difusión" (R-D) para la aplicación del mecanismo de Turing a procesos biológicos.

De hecho, en el artículo de Turing este sistema parece dar cuenta de la gastrulación. Otro sistema de reacción en dos dimensiones da lugar a patrones que recuerdan moteados. También se sugiere que las ondas estacionarias en dos dimensiones podrían ser responsables de los fenómenos de filotaxis. El propósito de dicho trabajo es discutir un posible mecanismo por el cual los genes de un cigoto pueden determinar la estructura anatómica del organismo resultante.

Actualmente las ecuaciones de R-D responden a otros mecanismos de control para las formaciones de patrones biológicos, como la generación de osciladores bioquímicos y de ritmos celulares (ciclos circadianos), así como la señalización neural, arritmias cardíacas y las estructuras de formación en la evolución del ARN, o como hemos visto

---

<sup>201</sup>Una ecuación parabólica en derivadas parciales es una ecuación diferencial parcial de segundo orden del tipo  $Au_{xx} + 2Bu_{xy} + Cu_{yy} + Du_x + Eu_y + F = 0$  en la cual la matriz  $Z = \begin{bmatrix} A & B \\ B & C \end{bmatrix}$  tiene un determinante igual a 0.

Algunos ejemplos de ecuaciones diferenciales parciales parabólicas son la ecuación de Schrödinger y la ecuación del calor. Fuente: Wikipedia®.

<sup>202</sup> Turing, A. M. (1952) *The Chemical Basis of Morphogenesis*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, Vol. 237, No. 641. (Aug. 14, 1952), pp. 37-72.

anteriormente la polimeración de la actina F y su control de los mecanismos oscilatorios de contracción para la motilidad de los ameboides. De hecho, en el 2006 varios científicos de la Universidad de Freiburg<sup>203</sup> han sido capaces de explicar la dinámica y los parámetros de la formación del cabello, a través de los modelos matemáticos de reacción-difusión de proteínas, proporcionando de esta manera la primera confirmación experimental de la hipótesis de Turing de la formación de patrones biológicos.

Aquí proponemos relacionar el sistema de R-D con los osciladores de contracción de la actomiosina producido por la hidrólisis de ATP, concretamente en los mixomicetos. Como hemos visto anteriormente, su relación analógica y filogenética de dichas contracciones con las neuromusculares propone que los mecanismos oscilatorios de reacción-difusión no son únicamente patrones bioquímicos reactivos sino también son que actúan como agentes modificadores de la dinámica biofísica de todos los organismos que dependen de la agencialidad de la actomiosina, provocando inducciones motrices coordinadas y coherentes, con un sentido uexkülliano de Planmäßigkeit o conformidad a un plan. Un plan conforme a su vez de una causalidad eficiente cuya teleonomía es la confirmación de una conducta adaptativa de mayor enriquecimiento de experiencia útil para la supervivencia individual (efecto Baldwin, o selección de habilidades de aprendizaje) y para la especie (asimilación genética, ontogenética, o inducción embriológica como la eficiencia de los sistemas R-D para la gastrulación).

Suponiendo que esto se pudiera confirmar, vendría corroborado por un aumento del buffer biomolecular de los agentes almacenando cierta “memoria química” ya vista anteriormente en las enzimas. Pero primero vamos a familiarizarnos con el concepto matemático de sistema R-D en los parámetros que más nos interesan esclarecer:

Un sistema de reacción-difusión se representa de forma general a través de la ecuación

$$\partial_t \mathbf{q} = \underline{D} \Delta \mathbf{q} + \mathbf{R}(\mathbf{q}),$$

cuya cada componente del vector  $\mathbf{q}(\mathbf{x},t)$  representa la concentración de una sustancia,  $\underline{D}$  es una matriz diagonal de coeficientes de difusión<sup>204</sup>,  $\Delta$  hace referencia al operador laplaciano y  $\mathbf{R}$  comporta las reacciones locales.

---

<sup>203</sup> Max Planck Society (2006, November 30). Control Mechanism For Biological Pattern Formation Decoded. ScienceDaily.

<sup>204</sup> En la física, el *coeficiente de difusión* es un valor que representa la facilidad con que cada soluto en particular se mueve en un disolvente determinado. Depende de tres factores:

- Tamaño y forma del soluto
- Viscosidad del solvente
- Temperatura (Difusividad térmica)

Los coeficientes de difusión para líquidos son del orden de  $10^{-5}(\text{cm}^2/\text{s})$ , para gases del orden de  $10^{-1}(\text{cm}^2/\text{s})$  y para sólidos  $10^{-9}(\text{cm}^2/\text{s})$ .

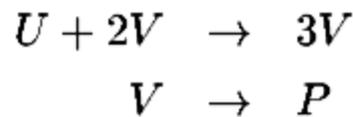
Este coeficiente aparece en la Ley de Fick, relacionada con la difusión de materia o energía. En el caso de existir diferencias de concentración de cualquier especie (concentración de sustancia o temperatura), *el paseo aleatorio de las moléculas se llevará a cabo desde las regiones con mayor concentración hacia las regiones de menor concentración*. El flujo de sustancia irá en el sentido opuesto del gradiente de concentración y, si éste es débil, podrá aproximarse por el primer término de la serie de Taylor, resultando la ley de Fick:

La reacción y la difusión de las especies químicas pueden producir una variedad de patrones, que recuerda a los que a menudo se ve en la naturaleza. Las ecuaciones de Gray–Scott son un modelo que se utiliza muy a menudo (Pearson 1993; Lee, McCormick, Ouyang y Swinney 1993).

Las ecuaciones son

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} &= r_u \nabla^2 u - uv^2 + f(1 - u) \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= r_v \nabla^2 v + uv^2 - (f + k)v\end{aligned}$$

Las reacciones químicas



Las ecuaciones diferenciales parciales que modelan este proceso pueden ser simuladas

Uno también puede simular el proceso subyacente, que es estequiométricamente conservador (que representa la fuente de U y el desagüe de U, V, y P.) El hecho de que todas las interacciones son locales hace que este un buen candidato para una implementación paralela. La difusión puede ser modelada por un proceso de intercambio explícitamente conservadora entre los vecinos donde las reacciones se modelan localmente en cada locus por un procesador simulado.

Un análisis de estabilidad lineal muestra sin embargo que cuando se linealiza el sistema de dos componentes en general

$$\begin{pmatrix} \partial_t u \\ \partial_t v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_u & 0 \\ 0 & D_v \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \partial_{xx} u \\ \partial_{xx} v \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F(u, v) \\ G(u, v) \end{pmatrix}$$

Tal como Turing mostró, un estado que es estable en un sistema local, debe ser inestable en presencia de la difusión.

$$\mathbf{j} = -D \nabla c$$

siendo  $D$  el coeficiente de difusión de la especie de concentración  $c$ .

La *difusión* (también difusión molecular) es un proceso físico irreversible, en el que partículas materiales se introducen en un medio que inicialmente estaba ausente, aumentando la entropía (Desorden molecular) del sistema conjunto formado por las partículas difundidas o soluto y el medio donde se difunden o disuelven.

Normalmente los procesos de difusión están sujetos a la Ley de Fick. La membrana permeable puede permitir el paso de partículas y disolvente siempre a favor del gradiente de concentración. La difusión, proceso que no requiere aporte energético, es frecuente como forma de intercambio celular. Fuente: Wikipedia®. Las cursivas mías.

Si tenemos una onda plana de perturbación tipo

$$\tilde{\mathbf{q}}_{\mathbf{k}}(\mathbf{x}, t) = \begin{pmatrix} \tilde{u}_{\mathbf{k}}(t) \\ \tilde{v}_{\mathbf{k}}(t) \end{pmatrix} e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{x}}$$

cuya solución homogénea estacionaria ha de satisfacer

$$\begin{pmatrix} \partial_t \tilde{u}_{\mathbf{k}}(t) \\ \partial_t \tilde{v}_{\mathbf{k}}(t) \end{pmatrix} = -k^2 \begin{pmatrix} D_u \tilde{u}_{\mathbf{k}}(t) \\ D_v \tilde{v}_{\mathbf{k}}(t) \end{pmatrix} + \mathbf{R}' \begin{pmatrix} \tilde{u}_{\mathbf{k}}(t) \\ \tilde{v}_{\mathbf{k}}(t) \end{pmatrix}.$$

Idea de Turing sólo se puede realizar en cuatro clases de equivalencia de los sistemas caracterizados por los signos de la jacobiana  $\mathbf{R}'$  de la función de reacción. En particular, si un número finito de vector de onda  $\mathbf{k}$  se supone que es el más inestable, el jacobiano debe tener los signos

$$\begin{pmatrix} + & - \\ + & - \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} + & + \\ - & - \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} - & + \\ - & + \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} - & - \\ + & + \end{pmatrix}.$$

Esta clase de sistemas se denomina *sistema de activador-inhibidor* después de su primer representante: cerca del estado fundamental, un componente estimula la producción de ambos componentes, mientras que el otro inhibe su crecimiento. Su representante más destacado es la ecuación de Fitzhugh–Nagumo

$$\begin{aligned} \partial_t u &= d_u^2 \nabla^2 u + f(u) - \sigma v, \\ \tau \partial_t v &= d_v^2 \nabla^2 v + u - v \end{aligned}$$

Con  $f(u) = \lambda u - u^3 - \kappa$  que describe cómo un *potencial de acción* que viaja a través de un nervio<sup>205</sup>. Aquí,  $d_u, d_v, \tau, \sigma$  y  $\lambda$  son constantes positivas. Mientras que en el caso de las células animales, el potencial de acción es efectuado por los flujos de potasio y sodio, en las plantas y en protistas ameboides utilizan los flujos de potasio y calcio.

Aunque tanto FitzHugh como Nagumo se basaron en aspectos electrofisiológicos de neuronas, el potencial de acción en membranas de ameboides o de plantas son también consideradas para el estudio (cambios de permeabilidad, o el cese de corrientes iónicas regulados por proteínas). Un tema particularmente especial que nos centraremos más adelante reside en que los potenciales de acción se desencadenan cuando una

---

<sup>205</sup> FitzHugh R. (1955) *Mathematical models of threshold phenomena in the nerve membrane*. Bulletin of Mathematical Biophysics, N° 17. pp. 257–278.  
 FitzHugh R. (1961) *Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane*. Biophysical Journal. N° 1, pp. 445-466.  
 FitzHugh R. (1968) *Motion picture of nerve impulse propagation using computer animation*. Journal of Applied Physiology, N° 25. pp. 628-630.  
 FitzHugh R. (1969) *Mathematical models of excitation and propagation in nerve*. en H.P. Schwan, ed. Biological Engineering, McGraw-Hill Book Co., N.Y. Cap. 1, pp. 1-85.  
 Izhikevich E. M. (2007) *Dynamical Systems in Neuroscience: The Geometry of Excitability and Bursting*. The MIT Press, Cambridge, MA.  
 Nagumo J., Arimoto S., Yoshizawa S. (1962) *An active pulse transmission line simulating nerve axon*. Proc IRE. 50:2061–2070.

depolarización inicial alcanza un *umbral*. Es un umbral variable, entorno a -55 – -50 mV sobre el potencial de reposo de la neurona. En los estudios realizados por Iehiji Tasaki y Noburô Kamiya (1950) los pics de estímulo sobre el ectoplasma del plasmodio *Physarum polycephalum* respondían sobre valores de -75 mV (Burr y Seifriz 1955) lo que confirman la respuesta eléctrica de un organismo sin sistema nervioso como un mixomiceto ante un estímulo, sea mecánico como eléctrico<sup>206</sup>. Pero vamos a concentrarnos de momento en la aplicación de los patrones R-D que son modelos para la explicación de mecanismos fisiológicos de los mixomicetos que nos permitirán describir actividades fundamentales para el establecimiento de los principios mínimos cognitivos.

De hecho existen simulaciones de los patrones de agregación en espiral del AMP cíclico del *Dictyostelium discoideum* vía ecuaciones de FritzHug–Naguno (Vasiev, Hogeweg y Panfilov 1994). Las ondas descritas en R-D conforman los flujos de recepción y de liberación del AMP cíclico, proponiendo que la producción y el decaimiento del AMPc son proporcionales a la densidad de la célula. Una de las ecuaciones de R-D describe el movimiento quimiotáctico de la ameba hacia el AMPc extracelular, que está en función de la concentración celular y de su motilidad, proponiendo una onda inestable en la formación del flujo de corriente o streaming. La concentración celular del mixomiceto por el movimiento espiral que genera el AMPc es la fase del ciclo celular que genera el concentrado multicelular del pseudoplasmodio cohesionado gracias a las ondas de R-D.

Pero, a parte de ser la fase más espectacular del ciclo vital del *Dictyostelium discoideum*, es una de las fases más concluyentes en un proceso de quimiotaxis donde las amebas pueden sentir el quimioatractor o acrasina,<sup>207</sup> en este caso el Adenosínmonofosfato cíclico siendo dicha sustancia tanto el atractor externo como el segregado por las mixoamebas (Bonner y Savage 1947, Bonner 1949, Shaffer 1953, Shaffer 1956, y sobretodo Konijn, van de Meene, Bonner y Barkley 1967; Konijn, van de Meene, Chang, Barkley y Bonner 1969; Keller y Segel 1970). Aunque entraremos más adelante en detalle en el fenómeno quimioatractor de agregación de la familia de *Dictyostelium* como uno de los factores más espectaculares en una conducta

---

<sup>206</sup> Los estímulos eléctricos estudiados por los profesor Kamiya y Tasaki responden a una ecuación lineal hiperbólica de Lapique–Weiss  $I = b(I+c/d)$  donde *b* es la reobase (respuesta excitativa motora o sensitiva, es la corriente mínima aplicada a un tejido – en nuestro caso a un plasmodio – durante un largo periodo de tiempo para obtener una depolarización de la membrana del protoplasma) que describe la mínima intensidad (en mA) capaz de producir un potencial de acción, *c* la cronaxia (o el mínimo tiempo requerido para un umbral mínimo de estimulación eléctrica, es decir el tiempo necesario para que una intensidad doble de la reobase produzca efecto, medida en ms) y *d* es la duración del pulso eléctrico para los plasmodios *Physarum polycephalum*. Se trata de una ecuación lineal cuyo objetivo es encontrar el umbral de corriente tanto a nivel neuronal y que los profesores Harold Saxton Burr y William Seifriz corroboraron para dichos mixomicetos en Science en cuanto a umbral de excitabilidad eléctrica y su impedancia del protoplasma, así como los cambios rítmicos de su fuerza electromotriz.

<sup>207</sup> Se denomina acrasina a aquellas segregaciones de los mohos mucilaginosos o mixomicetos que son dinamizadores de una agregación. El término acrasina surgió del nombre “Acrasia”, del segundo libro de la obra de Edmund Spenser titulada “Faerie Queene”. Acrasia es la encarnación de la intemperancia que habita en “El Cobertizo de la Felicidad” que seducía a los hombres en contra de su voluntad y luego los transforma en bestias. Acrasia es también una obra de teatro en el griego akrasia que describe la pérdida del libre albedrío.

cooperativa no simbiótica, vamos a estudiar en este instante las parametrizaciones que fundamentan este caso puesto que son fuente de desarrollo de sistemas R-D con unas características muy especiales.

Para ello estudiamos el desarrollo de Evelyn F. Keller y de Lee A. Segel (1970; 1971) que ha sido un patrón de modelo de desarrollo morfogénico de campo de agregación quimiotáctico<sup>208</sup> válido tanto para los mixomicetos como para las bacterias E. Colli. Para ello nos basaremos en las explicaciones del profesor Sherratt (1994)

El modelo de Keller–Segel consiste en dos ecuaciones de R-D acopladas con la forma general siguiente:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \nabla \cdot \left\{ \overbrace{D_n(c) \nabla n}^{\text{Random cell movement}} - \overbrace{\chi(c) n \nabla c}^{\text{Directed cell movement}} \right\}$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \underbrace{D_c \nabla^2 c}_{\text{Chemical diffusion}} - \underbrace{n \delta(c)}_{\text{Chemical degradation by cells}}$$

Donde  $n(r, t)$  y  $c(r, t)$  son la densidad celular y la concentración química respectivamente,  $r$  y  $t$  son las coordenadas de espacio y tiempo. Los coeficientes de transporte,  $D_n$  y  $\chi$ , y la tasa o ratio de degradación química por célula,  $\delta$ , son funciones estrictamente positivas de  $c$ , y sus formas funcionales se debe especificar antes de que el modelo se pueda aplicar en una situación particular.

Es evidente que las diferentes formas funcionales adecuadas en diferentes casos se han prestado atención a la forma de  $\chi(c)$ , el coeficiente de transporte en función de la concentración de acrasina. Las expresiones más populares son una constante, una forma "logarítmica" ( $\chi \propto 1/c$ ), y una forma "cinéticoreceptora"<sup>209</sup> ( $\chi \propto 1/(\kappa + c)^2$ ), con  $\kappa$  como

<sup>208</sup> Teniendo en cuenta que la interacción en quimiotaxis tanto puede ser atractora como repulsora. Un nuevo estudio en redes es el de Borshe, R., Göttlich, S., Klar, A., Schillen, P. (2014) The Scalar Keller-Segel Model on Network. *Mathematical Models & Methods in Applied Sciences*. Vol. 24, N°2. 221

<sup>209</sup> En bioquímica, la denominada cinética del receptor-ligando es una rama de la cinética química en la que las especies cinéticas se definen por diferentes enlaces no covalentes y/o conformaciones de las moléculas implicadas, que se denotan como receptor(es) y ligando(s).

Un objetivo principal de la cinética del receptor-ligando reside en determinar las concentraciones de las diferentes especies cinéticas (es decir, los estados del receptor y del ligando) en todo momento, a partir de un conjunto dado de las concentraciones iniciales y un conjunto dado de constantes de velocidad. En unos pocos casos, se puede determinar una solución analítica de las ecuaciones de velocidad, pero esto es relativamente raro. Sin embargo, la mayoría de las ecuaciones de velocidad se pueden integrar numéricamente, o aproximadamente, usando la aproximación de estado estacionario. Otro de los objetivos es determinar el equilibrio final las concentraciones de las especies cinéticas, que es necesario para la interpretación de los datos de unión en equilibrio.

Un objetivo inverso de la cinética del receptor-ligando reside en estimar las constantes de velocidad y/o constantes de disociación de los receptores y ligandos de cinética experimental o datos de equilibrio. Las

una constante positiva). La forma logarítmica es matemáticamente conveniente porque puede dar lugar a viajar frentes de densidad celular, y puede ser parcialmente justificada por la ley de Weber-Fechner de comportamiento (Keller y Segel, 1971b; Keller, 1980), mientras que la forma del cinético-receptora da la máxima respuesta quimiotáctica a una concentración química particular,  $c = \kappa$ , es intuitivamente plausible. Una forma más detallada para  $\chi(c)$  que incluye una función de memoria fue sugerido por Boon y Herpigny (1986) Sherratt (1994) y Contreras (2008)<sup>210</sup>, basado en suposiciones intuitivas relativas a la fuerza de la generación de la respuesta quimiotáctica.<sup>211</sup>

En el caso de la función logarítmica justificable por la ley de Weber-Fechner introducida en sistemas de Reacción-Difusión (Ohta y Yoshimura 2005) volveremos más adelante. Forma parte indispensable de la tesis que proponemos en este trabajo como fundamento matemático del correlato de la excitabilidad de los estímulos surgidos entre el Umwelt y el Innenwelt de las amebas en la estimación de un umbral mínimo de sensibilidad, y por lo tanto de un umbral mínimo cognitivo “sintiente”.

Por lo que estamos observando, estos sistemas dinámicos potencialmente muy intrincados también pueden ser capaces de apoyar una forma mínima de la cognición.

---

concentraciones totales de receptores y ligandos a veces se han variado sistemáticamente para estimar estas constantes.

<sup>210</sup> En ecuaciones de Langevin una función de memoria disipativa, llamada también “memoria kernel” en funciones no Markovianas, proviene de una descripción estocástica del movimiento Browniano. Boon, J-P., Herpigny, B (1986) *Model for Chemotactic Bacterial Bands*. Bulletin of Mathematical Biology Vol. 48, No. 1, pp. 1-19.

Para un estudio más profundo sobre la función memoria – que no forma parte de nuestro trabajo - remito al magnífico e inteligible trabajo de tesis doctoral del profesor Claudio Contreras Aburto del departamento de física en Cinvestav, México, sobre los potenciales efectivos y funciones de memoria en dispersiones coloidales (Contreras 2008).

Como la naturaleza coloidal es un comportamiento biofísico fundamental para nuestros estudios, tanto del citoplasma como de la naturalezas plasmoidal y pseudoplasmoidal de los mixomicetos explícito únicamente aquí el concepto de función de memoria por su importancia en su correlato físico (aparte del puramente matemático). Especialmente la página 21, Contreras explica que en la descripción de sistemas coloidales (o también las de sol-gel), si se usan escalas de espacio y tiempo mesoscópicas (como formalmente se usa en clásica), esto conlleva a “que los potenciales de interacción entre pares de macro-partículas, llamados potenciales efectivos, no son suficientemente completas su descripción en su dependencia temporal. Esto es debido a que los potenciales efectivos solamente contienen información promedio-configuracional de dichas macro-partículas, de su constitución y distribución en el espacio. La información concerniente al solvente queda reducida a algunos parámetros independientes del tiempo. Para tomar en cuenta efectos de acoplamiento entre la dinámica del solvente –la dinámica rápida del sistema – y la dinámica del soluto –la dinámica lenta del sistema– se introduce el concepto de función de memoria. De esta manera, en una descripción mesoscópica completa, aparte del potencial efectivo, se requiere conocer la función de memoria del sistema. *La función de memoria es el remanente de las fuerzas estocásticas asociadas al solvente. Más aún, la función de memoria no solamente describe el acoplamiento con el solvente, también describe por qué el decaimiento de las fluctuaciones no es una simple exponencial*, pues captura los efectos de las interacciones derivables de un potencial, así como el de las interacciones hidrodinámicas. El origen físico del efecto de memoria puede interpretarse como el efecto del encajonamiento dinámico que las partículas ejercen entre sí, el cual a su vez es determinante en el movimiento colectivo así como para una partícula simple.” Para conocer el desarrollo matemático de la función de memoria ir a págs. 25 a 81.

<sup>211</sup> Más recientemente, Rivero y colegas (1989) propusieron un modelo continuo en el que la forma algebraicamente compleja de  $\chi(c)$  se determina a partir de un modelo estocástico simple para el comportamiento de una célula individual; considerando por separado los casos de células procariotas y eucariotas (Sherratt 1994).

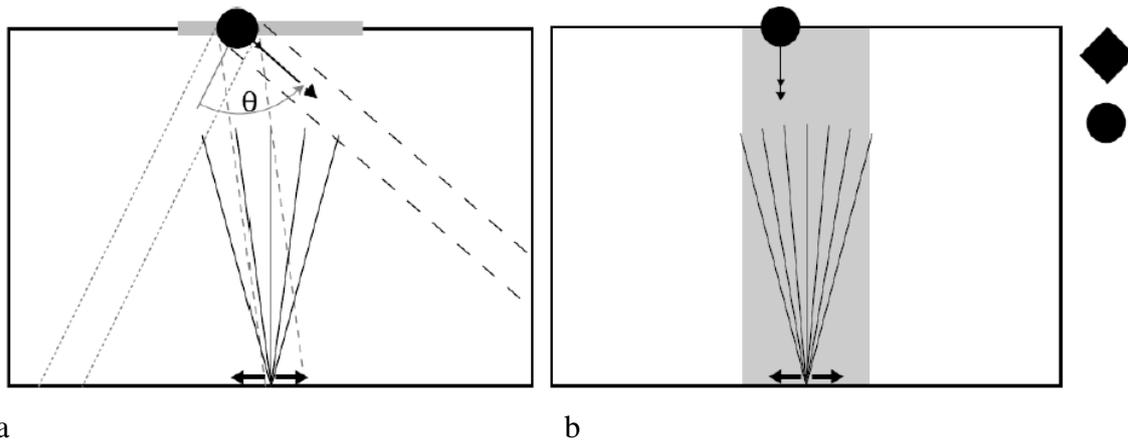
Esto es interesante, tanto desde el punto de vista teórico – que arroja más luz sobre el comportamiento de la generación de capacidades de los sistemas dinámicos incorporados (Port y Gelder 1995; Wheeler 2005) – y desde la biológica (Wheeler 2011, 2014). Como vemos en las bacterias y en los protistas ameboides (Castro 2012), estos organismos abordan una actividad sensoriomotora sofisticada e interactúan con su entorno en la medida que pueden: identificando y distinguiendo entre los diversos elementos de su entorno, tomando decisiones, adaptándose a los cambios, tomando parte en el comportamiento del grupo coordinado, y haciendo cambios estructurados en su entorno (Fuqua, Glazier, Brun y Alber 2004, Madigan, Martinko, Dunlap y Clark 2008). Se puede decir que actúan con un propósito, y es un buen caso de estudio de cómo se puede ser mínimamente cognitivo (Maturana y Varela 1980; Stewart 1996; Barandarian y Moreno 2006; van Duijn, Keijzer y Franken 2006; van Duijn 2011). Todo esto se logra sin un sistema nervioso. Entonces, mi pregunta es ¿cómo se genera el comportamiento? Hay una fuerte evidencia de que, al menos en algunas especies, como en los mixomicetos, los sistemas de reacción-difusión juegan un papel importante en la coordinación de la bioseñalización entre los sensores y actuadores espacialmente distribuidos (Yamada, Nakagaki, Baker y Maini 2004). También es interesante notar que muchos de los mecanismos moleculares utilizados por los organismos unicelulares se han conservado por la evolución y desempeñan un papel clave en el funcionamiento del cerebro en los animales superiores (Gerhart y Kirschner 1997; Goldstein 2001), por lo que determinados mecanismos bioquímicos presentes en los organismos unicelulares son parte fundamental en los orígenes de cognición natural.

Aunque se ha avanzado en el desarrollo de una comprensión a nivel de sistemas de algunos de los mecanismos implicados en la generación de conductas microorganismo, aún no tenemos un conocimiento suficiente de las propiedades espacio-temporales de los sistemas de R-D en juego en estos procesos para modelarlos a nivel de interacción de la difusión de productos químicos. Por lo tanto una investigación más abstracta de la conducta cognitiva mínimamente potencial de generación de un sistema de R-D incorporado parece muy pertinente.

El trabajo descrito por los profesores Kyran Dale y Phil Husbands del Centre for Computational Neuroscience and Robotics (CCNR) de la Universidad de Sussex, pretende ser una exploración inicial en esa dirección. Actúa como un estudio de sondeo del potencial de los sistemas de R-D en este contexto. El propósito de Dale y Husbands es determinar la implicación de los sistemas R-D como “wetware” de los principios mínimos de cognición de agentes “animat”<sup>212</sup>. También han establecido una buena interacción entre las CCNR y los sistemas R-D en una fase inicial de complementariedad en un medio activo. La orientación de los métodos desarrollados describe aspectos cognitivos explícitos como son la discriminación sensorial y las tareas de memoria.

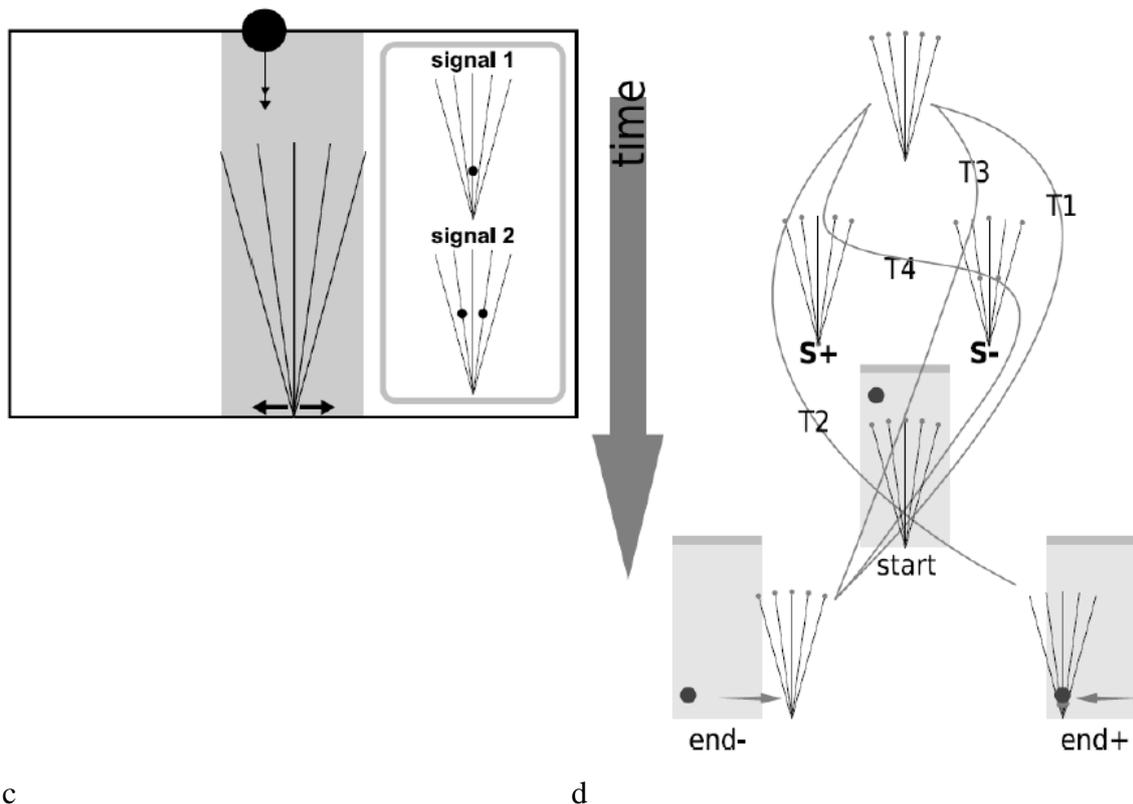
---

<sup>212</sup> Contracción de “animal-material”. Modelo de artefacto tecnológico computado para mimetizar determinadas conductas adaptativas sensor-motrices de animales. La palabra fue acuñada por Stewart W. Wilson en 1985, en “*Knowledge growth in an artificial animal*”, publicado en las primeras *Proceedings of an International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications*.



a b

Fig. 15. El experimento de Dale y Husbands. a) Experimento de fijación (a escala). Un animat con cinco patillas o vibrillas, repartidas con una envergadura de  $30^\circ$  entre cada vibrilla, se coloca en el centro del suelo de la pista. Durante el ensayo fue colocado un objeto circular en la zona de inicio a una altura determinada y en una trayectoria dentro de los límites definidos por los vibrillas distales del animat. El objetivo consiste en asegurar que el animat haya recibido algún estímulo del objeto que cae. La velocidad del objeto se indica por la posición relativa de las flechas grandes y pequeñas, que se extiende entre 0,5 y 7 unidades por segundo. El final de la prueba está señalado por el objeto cuando alcanza el suelo de la pista; momento en el que se utilizó la distancia entre el objeto y animat, junto con sus puntos de inicio relativos, para calcular una puntuación de aptitud para el animat. b) El experimento de la discriminación (a escala). Un animat con siete vibrillas repartidas en un lapso  $30^\circ$  se coloca en el centro del suelo de la pista. Durante un ensayo, un objeto se coloca en la parte superior de la pista dentro de la zona de colocación de gris en una trayectoria recta de caída en entre 3 y 4 unidades por segundo. Se llevó a cabo un par de ensayos con la misma posición de partida y de velocidad para los objetos con forma de diamantes y con forma de círculo simultáneamente. El animat fue recompensado por su capacidad para fijarse en el círculo y evitar al diamante.



c) El experimento de la memoria (a escala). Un animat con cinco patillas repartidas en un lapso  $30^\circ$  se coloca en el centro del suelo de la pista. Durante un ensayo, un círculo se colocó en la parte superior de la pista dentro de la zona de colocación de gris con una trayectoria rectilínea de caída de velocidad entre 3 y 4 unidades por segundo. Antes de la caída de un círculo el animat recibiría tanto 1 o 2 señales al unísono como 1 y 2 señales de forma consecutiva. Las señales consisten en un patrón arbitrario aplicado a las vibrillas del animat, después de lo cual el sistema se dejó reposar. El animat fue recompensado por su capacidad para revertir el comportamiento en la recepción de señal 1, por ejemplo, conmutando de un círculo fijado a otro círculo evitado.

d) Los cuatro ensayos (T1-4) que proporciona los componentes de la función adecuada de la tarea de memoria. **end +** y **end-** muestran las posiciones finales deseadas del animat relativas a la caída de objetos. La duración de todas las fases está en el intervalo [400, 600], y los estímulos para las últimas 10 unidades de tiempo. T1: En este ensayo, el animat recibe ninguna señal. La caída del círculo debe provocar una respuesta de aversión. T2: En este ensayo, el animat recibe la señal de  $s +$ . Como consecuencia, el animat debe fijarse en el círculo que cae. T3: En este ensayo, el animat recibe la señal de reinicio  $s -$ . Esto no debe afectar a la aversión del animat a la caída de un círculo. T4: En este ensayo, el animat recibe dos señales: el primario  $s +$  seguido por  $s -$ . La segunda señal  $s -$  debe restablecer la respuesta del animat, haciendo que se evite al círculo que cae.

Los comportamientos analizados en este estudio de Dale y de Husbands se basan firmemente en los trabajos de Randall D. Beer sobre conducta adaptativa en vida artificial, neuroetología, y sistemas dinámicos aplicados a la conducta y la cognición. El profesor Randall D. Beer actualmente es director del programa de formación de Brain-Body-Environment Systems NSF / IGERT del Indiana University en Bloomington. Él y sus

colegas del departamento de Biología y Neurociencias de la Case Western Reserve University introdujeron una serie de modelos de agentes autónomos y tareas para explorar los comportamientos mínimamente cognitivos relacionados con los aspectos de coordinación sensoriomotora, la percepción categórica activa y la memoria (Beer 1996, Beer 2003; Slocum, Downey y Beer 2000). Pero mientras que el trabajo de Beer utiliza un sistema de evolutivas “redes neuronales recurrentes de tiempo continuo” (CTRNN),<sup>213</sup> como podría ser el “sistema nervioso” de un agente, la investigación presentada por Dale y Husbands emplea un innovador modelo computacional conocido como sistema Gray-Scott (1984) de R-D en lugar de un controlador neuronal. Sensores y actuadores del agente están acoplados al sistema de R-D por los sensores y sondas químicas distribuidas espacialmente. Unos sensores químicos, que miden la concentración de reactivos en el medio químico en una ubicación específica, están conectados a los actuadores del agente a través de enlaces ponderados. Por lo tanto, con las concentraciones químicas se pueden controlar las salidas del motor. Las sondas químicas, que son capaces de cambiar la concentración de un producto químico determinado en un lugar específico, están conectadas a los sensores del agente a través de los enlaces ponderados. Por lo tanto la entrada sensorial puede perturbar el medio excitable. Los pesos y la especificidad química de estos enlaces han sido desarrollados. Como veremos, este sistema es capaz de producir los comportamientos cognitivos interesantes, incluyendo el uso evolucionado de una memoria química.

---

<sup>213</sup> Una red neuronal recurrente de tiempo continuo (CTRNN) es un modelo de sistema dinámico de redes neuronales biológicas. Un CTRNN utiliza un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias para modelar los efectos de la entrada del tren de pico sobre una neurona, es decir una serie de señales neuronales que se producen con frecuencia variable en el tiempo. CTRNNs son computacionalmente más eficientes que la simulación directa de cada aumento o pico en una red, ya que éstas no modelan activaciones neuronales en este nivel de detalle.

Para una neurona  $i$  en la red con el potencial de acción  $y_i$  de la tasa de cambio de la activación está dada por:

$$\tau_i \dot{y}_i = -y_i + \sigma \left( \sum_{j=1}^n w_{ji} y_j - \Theta_j \right) + I_i(t)$$

Donde:

- $\tau_i$  : Constante de tiempo del nodo postsináptica
- $y_i$  : La activación del nodo postsináptica
- $\dot{y}_i$  : Tasa de variación de la activación del nodo postsináptica
- $w_{ji}$  : Peso de la conexión desde el pre al nodo postsináptica
- $\sigma(x)$  : Sigmoide de  $x$  ej  $\sigma(x) = 1/(1 + e^{-x})$ .
- $y_j$  : La activación del nodo presináptica
- $\Theta_j$  : Sesgo de nodo presináptica
- $I_i(t)$  : Entrada o imput (si los hay) al nodo

Las CTRNN se han aplicado frecuentemente en el campo de la robótica evolutiva, donde han sido utilizados para hacer frente a, por ejemplo, la visión, la cooperación, o incluso el comportamiento mínimamente cognitivo.

La elección de un modelo de “animat” evolucionado, para demostrar el potencial de un nuevo controlador de R-D es de suma importancia para nuestro trabajo por tres consideraciones. Primero de todo es que la conducta en cuestión ha de ser cognitivamente interesante; por lo que, segundo, debe haber una expectativa razonable de que los controladores resultantes pueden ser analizados y comprendidos.

El término de “conducta mínimamente cognitiva” pretende connotar el comportamiento simple que plantea cuestiones cognitivamente

En términos generales, el comportamiento visual guiado proporciona un excelente escenario en el que explorar las implicaciones cognitivas de ideas dinámicas y adaptativas de comportamiento, ya que plantea una serie de cuestiones de interés inmediato. (Beer1996)

De acuerdo con la tesis de Beer, Dale y Husbands tomaron para la prueba de memoria una tarea de orientación visual-háptico, a través de unas cinco vibrisas (whiskers) conforme a los requisitos de la cognición mínima. Dale y Husbands reemplazaron el sistema neuronal de Beer por un modelo de “wetware” de R-D Gray-Scott de dos componentes.

Anteriormente se había estudiado la capacidad de memoria de un sistema de R-D Belousov-Zhabotinsky (BZ)<sup>214</sup>. Las soluciones para las tareas de orientación y la discriminación podían fácilmente evolucionar, pero los controladores basados en BZ fallaron al encontrar soluciones a la tarea de memoria.

Esto sugiere que en el caso de este autómatas celularanillado de Dale y Husbands, con las propiedades del sistema de R-D Gray-Scott, permitió la creación de una huella de memoria que en el Oregonator o sistema R-D Belóusov-Zhabotinsky no pudo fijarse. Los resultados ofrecidos por Dale y Husbands muestran que la capacidad de los controladores de Gray-Scott para llevar a cabo la tarea de memoria se basan en la formación de, una onda estacionaria semi-estable, la cual se mantuvieron por la dinámica de R-D en el transcurso de las prueba de memoria. No se observó dicha onda estacionaria en los controladores basados en BZ evolucionados. El análisis de estabilidad lineal de este tipo de ondas estacionarias es un problema difícil, pero se

---

<sup>214</sup> La Reacción de Belousov-Zhabotinsky, o Reacción BZ es una reacción oscilante que sirve como ejemplo clásico de la teoría del caos. Fue descubierta independientemente por Borís Pávlovich Belóusov y Anatol Zhabotinsky en los años cincuenta del siglo pasado. La reacción de BZ es en esencia una reacción redox en la que se oxida el ácido malónico por bromatos en un medio ácido. Un aspecto esencial de la reacción BZ es su así llamado “excitabilidad”; bajo la influencia de estímulos, los patrones se desarrollan en lo que de otro modo sería un medio perfectamente en reposo. Se han hecho varios estudios del comportamiento de agregación de los pseudoplasmodios *Dictyostelium discoideum* con los patrones oscilatorios de R-D Belóusov-Zhabotinsky. Debido a que la concentración interna de cAMP inactiva el receptor de cAMP externo, una célula individual presenta un comportamiento oscilatorio. Este comportamiento produce las bonitas espirales que se ven en las colonias convergiendo, lo que es una reminiscencia de la reacción BZ y de los autómatas celulares cíclicos. Pero más que una comparativa de patrón matemático analógico (Martiel y Goldbeter 1985), es una corroboración por Martin Gobulitski, Edgar Knobloch e Ian Stewart en 1997 (Stewart 1998) ya predichos por Günter Gerisch (1968). Posteriormente se encontraron dichos patrones de BZ en los plasmidios *Physarum polycephalum* (Nakagaki, Yamada y Toth 2001; Adamatzky 2009a).

puede hacer analíticamente en el caso del modelo de Gray-Scott (Vanag y Epstein 2007). Las soluciones localizadas se asemejan a las observadas en los controladores de memoria exitosas. Experimentos con sistemas BZ de dos componentes han demostrado que, bajo las condiciones adecuadas, pueden servir como dispositivos de memoria imprimible. Por ello sostenemos esta viabilidad que, en el caso de organismos como la e-coli o los mixomicetos funcionan como parámetros atractores. Soluciones de estado estacionario se pueden lograr utilizando parámetros especialmente seleccionados, pero parece que la oportunidad de descubrir tales configuraciones en células autómatas es significativamente menor que en el caso Gray-Scott.

Esto nos lleva a considerar que el modelo de “animat” a través de wetware R-D podría evolucionar con la posibilidad de introducir en los modelos de control un sensor de umbral de gradientes. Esto permitiría afinar la conducta sensormotriz del “animat” generando un patrón de reconocimiento quimiotáctico (memoria química) en un tipo de buffer que almacene según patrones de convergencia de procesos de aprendizaje de memoria a corto plazo – elemento clave para la evasión de obstáculos – con una estrategia de la denominada “*memotaxis*”<sup>215</sup> (Castellanos, Lombardo, Makarov, Velarde y Arena 2008; Velarde, Makarov, Castellanos, Song y Lombardo 2009). Esta tercera consideración es tan solo una propuesta a desarrollar, pues no esta de momento muy investigada<sup>216</sup>. Se trataría de complementar el patrón desarrollado por Dale y Husbands con los sistemas trabajados por Paolo Arena, Manuel García Velarde y Valeri Makarov, a los que introduciría también un nuevo patrón de umbrales sensoriomotrices, no estudiado aún por los investigadores de la Alife, a través de la ley de Weber-Fechner y la ley de potencia de Stevens (Ohta y Yoshimura 2005) modificadas según criterios que mencionaré más adelante.

Estos animats evolucionados que propongo podrían perfectamente ser híbridos con plasmodios *Physarum polycephalum* en alguno de los prototipos para investigar comparativas, tal como han estado desarrollando el grupo de investigadores encabezados por Andrew Adamatzky de la Department of Computer Science, Director of the Unconventional Computing Centre de la University of West England, y miembro del Bristol Robotics Lab.

Antes de trabajar con híbridos autómatas celulares híbridos con mixomicetos, Adamatzky ya había desarrollado con Paolo Arena y colegas a generar prototipos de robots autónomos que funcionan su navegación con sistemas de procesadores híbridos R-D Belóusov-Zhabotinsky (BZ) con chips de redes neuronales celulares (CNN)

---

<sup>215</sup> La idea de “*memotaxis*” es original del profesor Manuel Garcia Velarde del Instituto Pluridisciplinar, Universidad Complutense de Madrid. Velarde formalizó este principio, que generaliza el fenómeno de la quimiotaxis bacteriana introduciendo el concepto de “*memotaxis*” de una forma simple pero eficiente: si alguien toma una decisión basada en una cierta información real, y persigue esta decisión por una cierta cantidad de tiempo, incluso por encima de las señales contradictorias y ruidosas que se acoplan por un momento, continúa manteniendo esa decisión a pesar de la información sensorial que podría sugerir diferentes respuestas.

<sup>216</sup> La metodología completa está todavía en desarrollo y el grupo de Arena, Velarde y colegas no tienen resultados muy interesantes en los experimentos biológicos que se encuentran actualmente bajo investigación para evaluar la presencia de este fenómeno en el nivel de decisión en los animales.

demuy altaescala de integración (VLSI) (Adamatzky, Arena, Basile, Gamona-Galán, De Lacy Costello, Fortuna, Frasca y Rodríguez-Vázquez 2004).

En este apartado hemos querido mostrar que es posible registrar otro de los elementos básicos que forman parte de los principios mínimos cognitivos como es la capacidad de memoria. A través de sistemas puramente químicos como los de Reacción-Difusión hemos visto que aplicados a la arquitectura de células artificiales “animat” evolutivos, sus resultados llegan a ser sorprendentes. La capacidad de recordar donde tiene que caer determinados objetos y discriminar la forma de los mismos (por asimetrías) a través de ciclos de formación de ondas estacionarias es un paso fundamental de comportamiento no nervioso de memoria química que nos lleva a mostrar uno de los peldaños constructivos de la cognición.

No obstante estamos en una situación delidada a la hora de establecer un conato de conducta química de un sistema químico de R-D con un correlato de la cognición en organismos vivos. El automantenimiento de las reacciones fuera de equilibrio y procesos de individuación también son dados en estructuras disipativas de R-D (estudiados también en modelos de Gray–Scott) (Virgo 2011) y se ha observado una capacidad de comportamiento adaptativo a través de un efecto de retroalimentación negativa<sup>217</sup> provocado por la homeostasis producida entre el entorno del reactivo y la autoorganización difusoria del agente. Podemos establecer entonces una condición de posibilidad de conductas adaptativas en agentes químicos no vivos que poseen un parámetro de los correlatos de la cognición mínima. Algo semejante a los procesos de autopoiesis de las micelas vistas anteriormente. Esto sugiere que la diferencia entre la capacidad cognitiva de estructuras no vivientes y los organismos vivos es cuestión de grados, pero también de la relación de dependencia de dichos parámetros o propiedades entre grados o niveles consistentes de realidad y esto es hablar de superveniencia.

Más adelante veremos como los patrones Gray–Scott de R-D son parámetros muy útiles para determinar el comportamiento locomotiz de los auténticos plasmoidios *Physarum polycephalum*, donde la actividad química polarizadora de la concentración de ATP en la punta del plasmodio superviene a la capacidad locomotriz del mismo (Takagi, Nishiura, Nakagaki, Ueda y Ueda 2006). Es decir que la toma de decisión que realizará el plasmodio al dirigirse hacia un lugar influenciado por la presencia de quinina (repelente) en el entorno comprende parámetros de R-D bajo la condiciones sol-gel del plasmalema.

---

<sup>217</sup> La retroalimentación negativa o feedback negativo es un tipo de realimentación en el cual el sistema responde en una dirección opuesta a la señal. La actividad de los efectores se opone a cualquier desviación de la variable controlada. Una forma particular de la retroalimentación negativa la encontramos donde el gradiente de energía que impulsa un sistema es una función decreciente de la actividad global del sistema. Nathaniel Virgo (2011) afirma que esa retroalimentación negativa podría haber desempeñado un papel vital en el origen y evolución de la vida primitiva.

## Capítulo 4. Biocomunicación: De la mecanotransducción de señales a la toma de decisiones (decisión making) para dar sentido (sense making)

En este apartado vamos a profundizar en el desarrollo de la comunicación en los sistemas biológicos. Partimos de la transducción de señales, de la mecanotransducción registrada en los estudios de tensegridad anteriormente vistos, para ofrecer un paso facultativo de toma de decisiones inmediatamente después de haber recibido las cascadas de señales transducidas. La criba de señales químicas y su entrelazamiento en ciclos metabólicos, por ejemplo, es una fase nueva donde la recepción de señales toma en cuenta el mensaje que infiere su naturaleza biofísica y bioquímica. Los factores que hacen significativos su puesta en dinámica es un reflejo indudable de lo que llamamos comunicación. Esta comunicación o biocomunicación fundamenta aspectos que se desarrollan fundamentalmente en niveles de redes biomoleculares, y son imprescindibles para una posible comprensión de aspectos que tratamos de defender como cognitivos en organismos unicelulares y sin sistema nervioso. La conducta adaptativa estudiada desde un análisis de la biocomunicación ofrece un paisaje nuevo desde un nivel más elemental de autoorganización, la molecular.

Anteriormente hemos expuesto la condición de memoria a nivel molecular a través de una actividad de amortiguación y de almacenamiento de patrones moleculares en las enzimas para agenciar la catálisis. Esa capacidad denominada de buffer ofrece a las enzimas, al igual que a mensajeros de segundo orden, una capacidad de procesar señales y, por lo tanto unas propiedades que podemos denominar “semioquímicas”. Actualmente se conoce más a la semioquímica como un tipo de agentes químicos que como una propiedad<sup>218</sup>. Un semioquímico es un término genérico utilizado para una sustancia o mezcla química que lleva un mensaje para el propósito de la comunicación. La comunicación semioquímica se puede dividir en dos grandes clases: la comunicación entre individuos de la misma especie (intraespecífica) o la comunicación entre diferentes especies (interoespecífica). Es bien conocido el papel del óxido nítrico en la señalización celular, en la formación de GMP cíclico y en el metabolismo<sup>219</sup>. Pero la biocomunicación molecular ofrece una perspectiva muy amplia y compleja de los principios semióticos de comunicación celular y de las células como sistemas complejos de códigos interrelacionados (Görlich, Artmann y Dittrich 2011).

Todo este análisis es fundamental, puesto que en los organismos vivos, los procesos significativos tienen lugar tanto en un marco biomolecular como en sus complejidades emergentes, puesto que la agencialidad se ofrece en toda interrelación entre clausuras operacionales autopoieticas y medios circundantes perceptibles y significativos.

---

<sup>218</sup> Se utiliza por lo general en el campo de la ecología química para abarcar feromonas, alomonas, kairomonas, atrayentes y repelentes.

<sup>219</sup> Murad, F. (1999) *Discovery of Some of the Biological Effects of Nitric Oxide and Its Role in Cell Signaling* (Nobel Lecture). *Angewandte Chemie*. Vol 111, No. 13-14, pp. 1976-1989.

Vamos a desarrollar pues dos marcos que son entre sí autónomos, pero a su vez interdependientes para la comprensión del fenómeno de tomar decisiones sobre posibilidades autopoiéticas. El primer marco de estudio será la capacidad biomolecular de tomar decisiones. Ésta se describe en los procesos de mecanotransducción a nivel biomolecular, en donde encontraremos opciones de caminos de procesamiento de señales moleculares en el desarrollo de filtraciones de dichas señales. Cuando hay innumerables señales de otros procesos (sean metabólicos o de otros ciclos que interactúan al mismo tiempo) se provocan lo que se denomina “ruido”. Para discriminar las señales bioquímicas que están ligadas a un u otro proceso se ha de efectuar una discriminación. Para ello nos vamos a fundamentar en la “semántica molecular” descrita por Dennis Görlich, Stefan Artmann y Peter Dittrich (2011) como patrón fundamental para generar tanto la discriminación de señales como para tomar decisiones sobre las mismas. He aquí el primer marco de desarrollo de toma de decisiones en transducción de señales que nos llevará a la percepción de las células como sistemas semánticos.

El segundo marco de desarrollo se basa en el estudio de la toma de decisiones a nivel de los organismos unicelulares. Primero basaremos el estudio sobre la emergencia de la semántica molecular a la semántica celular para ver primero si las toma de decisiones celulares supervienen o no de las tomas de decisiones moleculares; y luego para estudiar si de la toma de decisiones se puede devenir una toma de sentido a nivel celular.

Estudiaremos el caso concreto de la toma de decisiones en los plasmodios *Physarum polycephalum* como ejemplo. El objetivo es ofrecer al lector un desarrollo de la toma de decisiones como base de reconocimiento de lo que se denomina memoria espacial, y como dichas toma de decisiones pueden ser descritas como un “dar sentido” a la relación entre el entorno y el mundo interno del organismo.

Aquí la toma de decisiones a nivel biomolecular podría ser parte implicada de procesos pre-cognitivos para emerger a otro nivel más complejo, al organismo en su totalidad, y en su actividad agencial, de forma que fundamente uno de los pilares de la cognición en los organismos unicelulares.

El interés que plantea nuestro trabajo para unas futuras investigaciones – aunque fuera del marco del desarrollo de esta tesis – estriba sobre la toma de decisiones realizadas en los mohos mucilaginosos, tanto plasmodios como pseudoplasmodios, para poder comparar su actividad conductual en el desarrollo automotriz con el que realizan algunas células del sistema neuroinmunológico de los mamíferos. Se trataría pues de establecer una comparativa conductual de patrones de conducta en estadios complejos, como por ejemplo, los desarrollados por las microglías en un estadio descontrolado fagocitador. Al igual que los plasmodios, las microglías modifican su morfología (normalmente ramificada) y adquieren un aspecto ameboide. Lo que nos recuerda las fases esclerótidas quiescentes de los plasmodios, a la fase ameboidal en ramificación en su fase activa, en su desplazamiento fagocitador.

## La semántica celular y códigos moleculares. Enfoques biosemióticos

Debemos de aclarar que en la historia reciente de la biosemiótica, el estudio de semántica celular es un pilar fundamental para el desarrollo de la biocomunicación, no sólo en niveles, por decirlo así, horizontales de red comunicativa, sino también en los procesos subyacentes de que fundamentan las emergencias constitutivas en niveles jerárquicos. De esta manera se podría explicar la superveniencia o no-superveniencia de procesos agenciales de nivel funcional más complejo y/o de niveles superiores de organización.

De hecho puede afirmarse que ninguna explicación en la ciencia tiene un aspecto narrativo en el que la historia que se les diga (el explanans) debe tener, por así decirlo, el derecho lógico y el poder semiótico de generar una representación creíble de la historia del objeto (el explanandum). La explicación que comprende tanto explanans como explanandum, en caso de que seade forma narrativa (de la lógica deductiva que se considera aquí como un tipo específico) lleva al lector a un determinado nivel de comprensión del fenómeno (Emmeche 1997).

Aquí deseamos dejar claro que proponemos una explicación organicista de la situación, y más concretamente según la concepción de Emmeche de organicismo cualitativo, como hemos visto anteriormente. Esto es de acuerdo con las posibilidades que la biosemiótica permite abrirse camino como un nuevo paradigma que se desarrolla más allá de las polémicas entre mecanicistas y vitalistas, como habíamos dejado claro anteriormente bajo el concepto de teleomecanicismo de Timothy Lenoir (1982) o vital-materialidad que, a parte de Lenoir, también apoya Michael Wheeler (2011; 2014) donde la organización de cada estructura y nivel de agencialidad se retroalimentan en un funcionalismo que siempre tiene en cuenta la precariedad del cuerpo orgánico que la mantiene alerta en su sostenibilidad autoorganizativa (Di Paolo 2008).

Vamos a explicar con cierto criterio biosemiótico el desarrollo de una biosemántica a nivel macromolecular que permita orientarnos hacia la toma de decisiones como expresión de una dinámica organicista cualitativa en la que apuesta nuestro trabajo.

Dennis Görlich, del Institutodebioestadística i investigación clínica de la Universidad of Münster, ha desarrollado un método formal para evaluar la capacidad semántica de un sistema mediante el análisis de la capacidad de una red de reacción para poner en práctica los códigos moleculares<sup>220</sup>.

Görlich y sus colegas consideran a las células como los sistemas biológicos que procesan la información por medio de códigos moleculares. Pero ¿qué es un código molecular? Vamos a dar una respuesta que enriquecerá de la significación a medida que exponamos el trabajo de Görlich y sus colegas. Muchos estudios analizan el procesamiento de información celular exclusivamente en términos sintácticos (por ejemplo, mediante la medición de la entropía de Shannon de conjuntos de

---

<sup>220</sup> Görlich, D., Artmann, S., Dittrich, P. (2011) *Cells as semantic systems*. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects, Vol. 1810 (10), pp. 914–923.

macromoléculas), y resumen aquellos aspectos semánticos que se relacionan con el significado de la información adicional a nivel molecular. Görlich se centra en los aspectos semánticos de la información molecular, en particular sobre los códigos que organizan la dimensión semántica de la información molecular. En primer lugar, propone un marco conceptual general para describir información molecular. En segundo lugar, se presentan algunos ejemplos de códigos moleculares. Y en tercer lugar, presenta un enfoque matemático que hace que sea posible la identificación de los códigos moleculares como redes de reacción, es el desarrollo de la combinación. A través de un marco conceptual para describir información sistemática molecular y un enfoque matemático para identificar códigos moleculares, Görlich ve posible dar un modelo de la semántica formalmente consistente y empíricamente adecuada, basada en códigos de información molecular en las células. Por lo tanto podemos hablar de “código” como patrón de combinatoria de las modificaciones, o de las asignaciones o aplicaciones.

La investigación en la semántica de la información molecular es de gran importancia sobre todo a la biología de sistemas, ya que los códigos moleculares incrustados en los sistemas de códigos interrelacionados gobiernan los principales rasgos de las células. Describiendo las células como los sistemas semánticos podemos así desencadenar nuevos experimentos y generar nuevos conocimientos sobre los procesos fundamentales de procesamiento de la información celular.

El desarrollo de Görlich pone en relieve:

- Diferentes subsistemas de células implementan diferentes códigos moleculares.
- Los códigos moleculares incrustados en redes de códigos interrelacionados que gobiernan principales rasgos de las células.
- Los códigos moleculares se pueden describir en un marco conceptual general.
- Susodicho marco procura una formalización objetiva de posibles códigos moleculares.
- La existencia de diferentes códigos moleculares resultados en una visión semántica de la célula.

La sintaxis, la semántica y la pragmática son términos que denotan las subdisciplinas más importantes de la semiótica, la ciencia de la semiosis, es decir, de todos los procesos en que los signos se originan, almacenan, comunican y son eficaces.

La *sintaxis*— argumenta Görlich — es el orden en que los signos pueden ser combinados, los estudios de la función *semántica* se basan en el código de significación de los signos, y la *pragmática* aborda los patrones de comportamiento comunicativo en el que se utilizan señales significativas. Mientras que la sintaxis se refiere al orden de la combinatoria de los signos, los estudios de semántica infieren en su funcionalidad basada en el código. La pragmática se refiere a la utilización de signos y patrones de comportamiento comunicativo.

Para Shannon<sup>221</sup>, un sistema de comunicación consiste en mensajes que deben transmitirse; una fuente de información la selección de mensajes, un destino de la recepción de mensajes, un canal para la transmisión de mensajes, un transmisor para decodificar mensajes de manera que puedan ser transmitidos a través de los canales, un receptor de decodificación mensajes que se han transmitido por el canal, las señales que codifican los mensajes y se transmiten por el canal, una fuente de ruido, posiblemente, perturbando la señal durante la transmisión.

Pero Görlich va más allá. Toma como fundamento la teoría algorítmica de la información de la escuela de Göttingen fundada por Manfred Eigen, Bernd-Olaf Küppers. La teoría algorítmica de la información hace una cuantificación de la sintaxis de posible señales sencillas solo mediante la medición de su compresibilidad. Una señal se comprime mediante la codificación de ella, de tal manera que la señal codificada es más corta que la señal original. La codificación deberá permitir la reconstrucción exacta de la señal. La complejidad algorítmica (o de Kolmogorov) de una señal se define por la longitud de bits de codificación mínima que se puede calcular, como un programa, o la señal original en un autómatas abstracto, por ejemplo, una máquina universal de Turing. Pero también se fundamenta en el concepto de código de la escuela biosemiótica de Marcelo Barbieri que define a la célula como “un sistema epigenético hecho de tres categorías fundamentales (genotipo, fenotipo y ribotipos) que contiene al menos una memoria orgánica (el genoma) y al menos un código orgánico (el código genético).” (Barbieri 2003). Desde el punto de vista semántico, un código es más que un conjunto de palabras clave. Claus Emmeche y Jesper Hoffmeyer (1991) afirman que la cadena de los eventos de la vida requiere al menos dos tipos de códigos: un código para la acción (para la conducta) y otro para la memoria. El código conductual es necesariamente analógico, mientras que el de la memoria muy probablemente sea digital. Una idea que se relaciona bastante con la concepción de David Hull entre el “replicador” y el “interactor” (Hull 1980) pero enfatizando el carácter sígnico de los sistemas vivos. En el caso de Hoffmeyer y Emmeche el código dual se intercambia y se retroalimenta ofreciendo interdependencia de códigos, al igual que su dinámica codificadora y decodificadora, desde la codificación genética a la de los segundos mensajeros y hacia el quorum sensing o las diferentes taxias o tropismos, en las dos direcciones exo-intro / intro-exo (bottom up / top down). Görlich afirma que la bioquímica explica, por ejemplo, cómo la sintaxis y la semántica de la información hereditaria se relacionan en los organismos de hoy en día. Sin embargo, las leyes conocidas de física y química no cumplen con una relación particular de la sintaxis y la semántica genética - de lo contrario, la arbitrariedad o la contingencia del código genético no podría haber evolucionado. La investigación sobre la pragmática de la información genética debe estudiar el origen y la evolución del código utilizado para el desciframiento.

Görlich lo expresa de este modo: “los factores pragmáticos establecen las condiciones básicas en el uso de cualquier otro código para la transmisión de señales, lo que puede, a

---

<sup>221</sup>Shannon, C. E. (1948) *A mathematical theory of communication*. Bell System Technical Journal. N° 27 pp. 379–423 (623–656).

su vez, transmitir el significado al referirse a los factores (por ejemplo, que denota un objeto en el mundo real, o para expresar el estado interno de la fuente de información).”(Görlich et al 2011)

Se pueden distinguir diferentes tipos básicos de usos de códigos moleculares, llamados también tipos de semiosis molecular. Barbieri diferencia entre la fabricación y la señalización de la semiosis (Barbieri 2008). En la semiosis de manufactura, una señal (por ejemplo, una molécula de ARNm) tiene la función de llevar un objeto material a su existencia (por ejemplo, una proteína). En la señalización de la semiosis (por ejemplo, en la transducción de señal), una señal tiene la función de establecer, estabilizar, o interrumpir un canal de comunicación. La fabricación y la señalización de la semiosis utilizan códigos para controlar los factores pragmáticos en la transmisión de la información: el destino, que es producida por el uso de fabricación de un código, y el canal de comunicación, que se abre o se cierra por el uso de un código de señalización (Artmann 2009).

En este punto me detengo ante una duda no resuelta de momento. Serán los códigos de fabricación (de acción) y los códigos de señalización (de memoria) interdependientes entre sí ¿Pero puede un código de fabricación serlo en otro momento de señalización, y viceversa? Emmeche y Hoffmeyer sugieren que el código de memoria sea de tipo digital, con la protección de la identidad del sistema como factor clave. Han de ser entonces códigos de relaciones estructurales en espacio y tiempo. De esta manera define el tipo de diferencias ambientales que el sistema selecciona en el entorno y al que responde. Pero requerirá de una etapa analógica para que se exprese el mensaje de la memoria. Una fase de codificación digital hace posible la replicación de la memoria, pero para expresar la memoria, la decodificación debe de ser analógica; ha de poder decodificar la población para procesarla. Por lo que los códigos para la acción del comportamiento genético, por ejemplo, serán analógicos.

Dice Anthony Wilden: “Lo analógico está imbricado en el significar mientras que el dominio digital del significado es más estéril. Es casi imposible traducir la rica semántica de lo analógico a una forma digital apta para comunicación con otro organismo” (Wilden 1980).

Pero: ‘...lo que las ganancias analógicas en semántica pierden en sintaxis, es lo que las ganancias digitales en sintaxis pierden en semántica. Así es porque no posee la sintaxis necesaria para decir ‘no’, o decir algo que implique ‘no’ se puede denegar o rechazar en el analógico, pero no se puede negar o anular’ (Wilden 1980)<sup>222</sup>

Sea cual sea el valor de esta hipótesis, se puede analizar el control molecular, desde una perspectiva teórica de información, en términos de la relación entre la semántica basada en el código de señales moleculares y la pragmática basada en las condiciones de contorno de la utilización de códigos molecular. A fortiori ha de haber un ligando entre el concepto de función semántica y el de código. Veamos cómo:

---

<sup>222</sup> Wilden, Anthony (1980). *System and Structure*. New York: Tavistock.p. 163.

La teoría algorítmica de la información molecular ofrece la relación de la sintaxis con la semántica y la pragmática basado en la ingeniería de sistemas híbridos a través de la computación (o cálculo), el control, y la coordinación. Estas son relaciones entre la sintaxis y la semántica, la semántica y la pragmática, y la pragmática y la sintaxis, respectivamente.

La computación o cálculo se utiliza aquí como un concepto semiótico que denota la relación del orden sintáctico de un objeto de bioquímica para su función semántica. La función semántica directa del ligando es la activación del receptor. Por ejemplo, en los sistemas de transducción de señales, la unión de un ligando extracelular de un receptor molecular que puede conducir a la activación del receptor y con ello el inicio de la propagación de la señal interna. Es importante tener en cuenta que los aspectos semánticos de la información molecular se pueden analizar por medio del concepto de código, y por tanto podemos hablar de una *semiótica de la computación*.

El control que va desde la función semántica al comportamiento pragmático puede ser efectuado bioquímicamente mediante la fabricación de nuevas moléculas, las moléculas de señalización entre las existentes, y las defuncionamiento de la aplicación de códigos molecular.

El concepto semiótico de control se utiliza así como lo que denota la forma abstracta de la relación entre el código basado en la función semántica de una estructura sintáctica y la pragmática del comportamiento de un sistema bioquímico que está causalmente influenciada por la función semántica. En la forma general de control no se especifica el comportamiento particular de un sistema bioquímico, sino que sólo se refiere a los tipos posibles de comportamiento efectivo. La pregunta entonces se puede plantear sobre la distinción de los posibles mensajes que un determinado código basado en mecanismos de control puede detectar.

La pragmática molecular estudia la utilización de códigos para la fabricación, la señalización y funcionamiento de la semiosis, y plantea la pregunta de cómo estos códigos se han originado y evolucionado. Görlich afirma que la coordinación se utiliza aquí como un concepto semiótico que denota la relación general entre el comportamiento pragmático de un sistema bioquímico, por ejemplo, una bacteria, en su medio ambiente y el orden sintáctico de la interacción entre los sistemas, por ejemplo, en una colonia de bacterias. Las normas de coordinación establecen un orden que comprende al menos dos sistemas (que entre sí pertenecen a sus respectivos entornos), de modo que el comportamiento de cada uno de los sistemas contribuye a las condiciones de contorno en el comportamiento de todos los demás sistemas. La coordinación es entonces la forma abstracta de la generación de la regla por la cual combinatoriamente, es decir, sintácticamente, se instituyó a los patrones de comportamiento ordenados entre los sistemas bioquímicos.

Desde la perspectiva semiótica, una conducta en particular es una señal que puede ser combinada con otros comportamientos sintácticamente. Por consiguiente podemos decir

que las células pueden percibirse como sistemas complejos de códigos interrelacionados.

En primer lugar, una señal externa llega a la célula y es reconocido por un receptor. Este reconocimiento lleva, al señalar la semiosis, a la formación de una señal interna. El código que se utiliza aquí es determinado por una correspondencia entre las moléculas de señalización externa e interna, es decir, un código de transducción de señales. En segundo lugar, una señal interna se promueve a través de la célula y lleva, al señalar la semiosis, a la activación o desactivación de un conjunto de genes. El código de regulación de genes utilizados en este proceso está determinado por una correlación entre los factores de transcripción y genes de transcripción. En tercer lugar, la transcripción de genes es la materia prima a un proceso de semiosis de fabricación, que generalmente se llama la “traducción”. El código que se utiliza aquí es el código genético, que se define por una correspondencia entre codones y aminoácidos. En paralelo a estos tres pasos códigos epigenéticos están implicados en la semiosis de funcionamiento, que controla la dinámica de la transducción de señales de código, el código de regulación de genes, y el código genético.

No debemos olvidar que codificar la dualidad involucra la interacción de dos procesos traslativos. Uno, de digital al analógico, por ejemplo, la epigénesis, y otro, de analógico a digital, por ejemplo la reproducción sexual. Pero, como también se anotó, ambos procesos no pertenecen a un mismo nivel de organización. La epigénesis sólo ocurre al nivel de cada organismo individual, mientras la reproducción sexual toma su significado semiótico sólo al nivel de evolución poblacional o de linaje

Sin embargo, mientras que también se ha declarado por Hoffmeyer que esta memoria digital es sólo una parte de la descripción, sigue siendo ambigua si la descripción digital del ADN transmite algo más que secuencias de aminoácidos de las proteínas de éxito, como por ejemplo, cuando se afirma que: “lo que debería ser especificado a través de la descripción memorizada no son los detalles materiales del sistema, sino sólo sus relaciones estructurales en el espacio y el tiempo” y que “la realización en el espacio y el tiempo de las relaciones estructurales especificados en el código digital define el tipo de diferencias en el entorno el sistema puede en realidad seleccionar y responder hacia una acción” (Hoffmeyer 2002).

En el extremo final de la cadena de transducción se encuentran las maquinarias celulares responsables de generar las respuestas. Cada tipo celular presenta maquinarias efectoras específicas, de tal forma que las señales generadas en la cascada de transducción de dos o más estímulos, aún siendo idénticos, activa en cada estirpe celular una respuesta distinta y que es definitoria del tipo celular. Por tanto, los rasgos fundamentales de una cascada de transducción en un sistema celular dado, tienen un carácter casi universal, porque los mismos eventos ocurren en gran variedad de sistemas celulares y frente a una gran diversidad de estímulos. Por lo tanto, la detección de estímulos y la respuesta a los mismos en todos los seres vivos, depende dentro de las células de las señales de transducción.

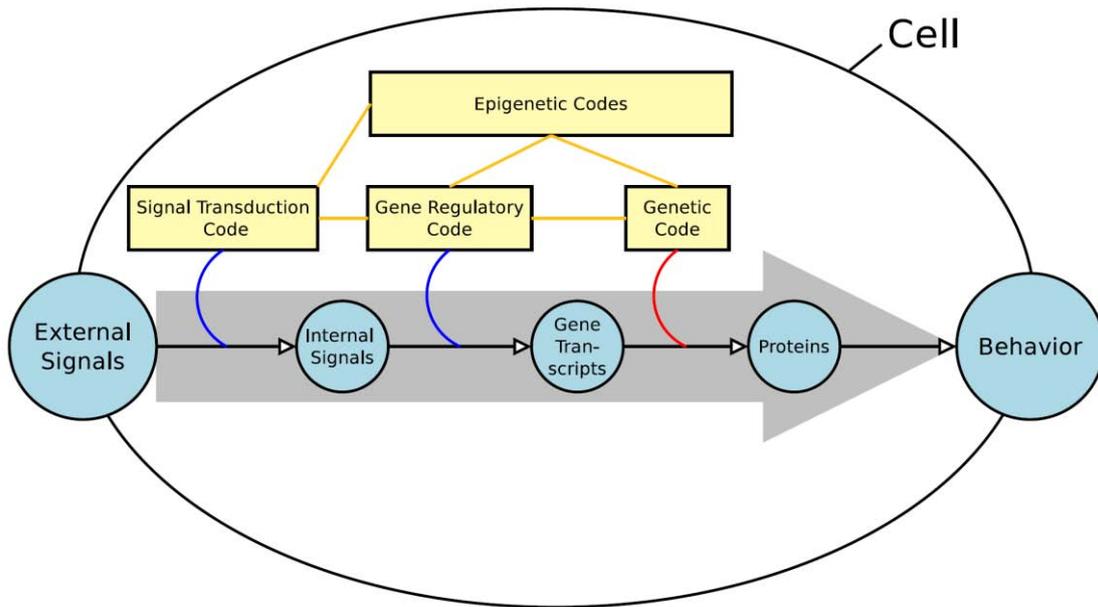


Fig. 17. Esquema de una célula como una red dinámica de los códigos de interacción, que se muestra en el contexto de la integración de la señal celular. Los círculos indican especies biológicas moleculares que participan en los procesos semióticos respectivos. Los colores de las líneas de conexión de señalización indican la semiosis (azul), fabricación de semiosis (rojo), y la semiosis de operación (amarillo) (Görlich, Artmann, Dittrich 2011).

Con la aplicación de los nuevos conceptos a diferentes redes, nuestro hallazgo básico demuestra que *la capacidad semántica de redes biológicas tiende a ser mayor que la capacidad semántica de las redes no biológicas estudiadas*. Por lo tanto, un paso importante en la transición de la no-vida a la vida debe haber sido *la utilización de una química que permite implementar códigos moleculares*. Según Görlich es una cuestión abierta cómo ha parecido esa primera codificación de la química. Pero, tenemos ahora un criterio que nos puede guiar en lo que tenemos que buscar. Siguiendo esta línea de pensamiento, parece que los sistemas biológicos “aprendieron” por evolución a hacer uso de químicos con altas capacidades semánticas seleccionando las asignaciones más adecuadas para su propósito. Existen al menos tres caminos evolutivos (no necesariamente disjuntos) para seleccionar una aplicación única de la contingencia real: (1) compartimentación, es decir, la separación espacial de dos asignaciones alternativas, (2) la separación por el tiempo de ejecución (tipo interruptor regulado, como un telómero), y (3) de fijación, es decir, la separación mediante la supresión de una de las aplicaciones alternativas. Para el código genético Görlich argumenta que al menos dos caminos son utilizados por las células para mantener la singularidad de la asignación.

Por otra parte, ahora podemos formular precisamente otra hipótesis, a saber, que durante el curso de la evolución de la capacidad semántica de la química empleada por los sistemas biológicos tiene una tendencia a aumentar, mediante el reclutamiento de nuevas químicas, aunque el aumento no es necesariamente monótono. Un mecanismo candidato es la invención y la mejora de los adaptadores de composición, al igual que las proteínas con dominios o genes intercambiables incluyendo su promotor-y-regiones

codificantes. Görlich tiene en cuenta que también la aparición y la evolución de las neuronas y los sistemas cognitivos están en línea con la hipótesis de aumentar la capacidad semántica.

Un ejemplo de sistemas cognitivos en células autómatas que sigue las relaciones entre sintaxis, semántica y pragmática en computación es el presentado por Soichiro Tsuda Stefan Artmann y Klaus-Peter Zauner (2008, 2009) llamado Phi-bot ( $\phi$ -bot) controlado por la conducta del mixomiceto *Physarum polycephalum*.

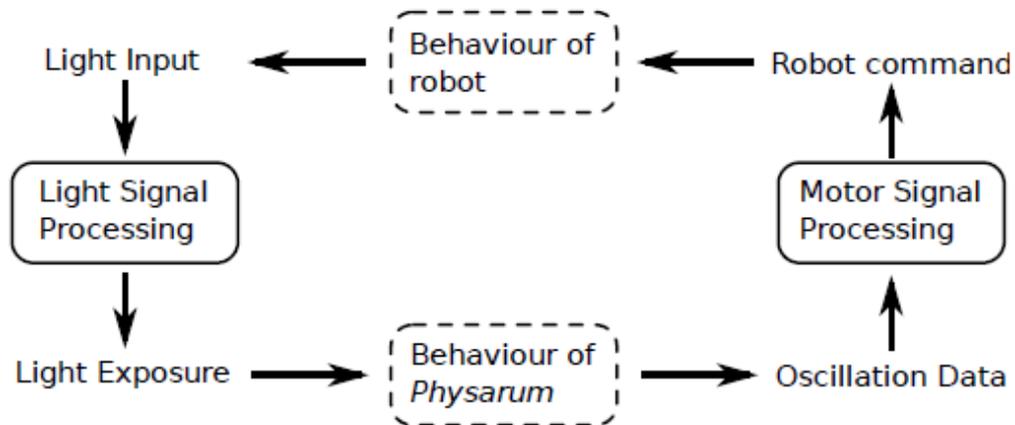


Fig 18. Bucle de interacción del robot llamado  $\phi$ -bot. Un  $\phi$ -bot es un robot controlado por el mixomiceto *Physarum polycephalum*. Cada parte de los corresponde diagrama ya sea a la sintaxis (sin caja), la semántica (cuadro sólido), o la pragmática (caja punteada).

Las capacidades de procesamiento de información del plasmodio, junto con la relativa facilidad de manipulación de las células plasmodiales, facilita el uso de este organismo simple en sistemas híbridos. El uso del *Physarum polycephalum* ofrece cierta conducta adaptativa en sistemas de ingeniería. El control del robot es un buen banco de pruebas para explorar esta posibilidad.

Para este propósito, se empleó la dinámica de oscilación contráctil de la célula para controlar robots. La frecuencia del ritmo de oscilación en una parte estimulada se incrementa si éste es un estímulo atractivo y decrece cuando es repulsivo. Los cambios de frecuencia afectan a las oscilaciones de otras partes a través de la corriente protoplasmática, formando así un patrón de fase espacial en la célula. El patrón global de fase emergente determina de forma eventual la dirección de la migración y con ello la conducta del organismo. Un plasmodio *Physarum* integrado en un robot se acopla al entorno del robot a través de interfaces bi-direccionales. Las señales externas recibidas por el robot se transfieren a la estimulación de señales a la célula *Physarum* como robot cerebro, y la reacción de la célula se transfiere de nuevo al robot y se interpretan como una fuente de señales de control para el robot.

Se sabe que la parte del plasmodio muestra una oscilación sincronizada está dentro de un diámetro de 1,5 mm. Se juega con estas dimensiones para formar la placa estrella donde se repartirá el plasmodio para integrarse en las partes del robot. La formación y

colapso de las estructuras de actomiosina dentro de la célula bombean el protoplasma a través de tubos ectoplasmáticos en los canales de la placa. La parte del plasmodio interior de un pozo funciona como un solo oscilador, referido como "Physarum oscilador", y está conectado a los otros osciladores (pozos) a través de tubos en el canal y por lo tanto toda la célula en forma de estrella puede ser visto como un sistema de oscilador no lineal acoplado.

El esbozo de información teórica de algunos procesos en el controlador del bio-híbrido  $\phi$ -bot dado anteriormente alude a características generales que parecen ser fundamentales para la arquitectura de este tipo de dispositivos, y tal vez de otros sistemas informáticos no convencionales. Sin embargo, en gran medida las diferentes propiedades físico-químicas de los medios computacionales utilizados en esos sistemas hacen que sea difícil proponer generalizaciones aún razonables de manera contundente. Las siguientes observaciones que abordan la eficiencia sintáctica, la generalidad semántica, y la versatilidad pragmática tratan de hacer una virtud de la necesidad dibujando algunas consecuencias de la importancia de las propiedades físico-químicas específicas de medios computacionales no convencionales.

Tsuda y colegas describen a la pragmática como la parte de la semiótica que trata sobre el origen, usos, y efectos de los signos dentro de la conducta en la que se presentan; la semántica ofrece la significación de los signos en todos los modos de significancia, y la sintáctica ofrece combinaciones de signos sin tener en cuenta sus especificaciones significativas o su relación con el comportamiento en el que ocurren.

De esta forma, la pragmática, la semántica y la sintáctica son interpretables dentro de una orientación conductual semiótica: la sintáctica que estudian las formas en que se combinan los signos, la semántica que estudia la correspondencia significativa de los signos, y así se genera el comportamiento interpretante sin la cual no hay significación, y la pragmática estudiar el origen, usos y efectos de los signos en el comportamiento total de la interpretación de los signos.

Por lo tanto, la sintaxis, la semántica y la pragmática son, subdisciplinas yuxtapuestas que se ocupan de aspectos de los signos aisladamente. Las propiedades sintácticas, semánticas y pragmáticas de los signos están relacionadas jerárquicamente entre sí, con la pragmática formando la base, ya que analiza la estructura general de cualquier comportamiento en el que las señales están involucradas. La semántica y la sintaxis se abstraen, en diferentes grados, desde el objeto de la pragmática: La semántica centra en la conducta interpretativa específica, y la sintaxis pone corchetes sobre la significación y analiza todos los métodos posibles por los cuales las señales se pueden combinar entre sí.

En una teoría de la computabilidad acotada, las definiciones generales de sintaxis, semántica y pragmática debe abstraerse de cualquier clase particular de los sistemas, por lo que la perspectiva de la teoría de la información se puede aplicar, no sólo a los seres humanos, sino también a otros sistemas vivientes, a los artefactos, y para los híbridos de ingeniería, tales como el  $\phi$ -bot. La sintaxis, la semántica y la pragmática, por lo tanto,

denotan diferentes maneras de representación estructural de cualquier tipo de sistema de procesamiento de información desde un punto de vista unificado, que, sin embargo, debe tener en cuenta la diferenciación entre tipos de medios computacionales.

Aunque la pragmática es la representación más fundamental de la información, el análisis del  $\phi$ -bot en términos de computabilidad acotado deberá comenzar con la sintaxis, ya que – desde un punto de vista general de ingeniería sobre los posibles sistemas de procesamiento de información – la semántica pueden más fácilmente ser descrita como el estudio de las condiciones límite relacionadas con el código que se deben cumplir por cómo los signos pueden combinar entre sí en un sistema de procesamiento de la información, y la pragmática como el estudio de las condiciones límite de comportamiento que se deben cumplir por cómo los signos pueden significar algo en un sistema de procesamiento de la información. Aplicado a la  $\phi$ -bot, la sintaxis, la semántica y la pragmática podrán cada una caracterizarse por una “palabra clave” tópica: cómputo, control y coordinación, respectivamente. Esto sugiere el uso de "enfoque Co<sup>3</sup>" – como trabajaría también Görlich y colegas en el campo de la semántica celular y molecular – de las siguientes observaciones sobre computabilidad acotada.

En primer lugar, las características esenciales de los medios computacionales como el plasmodio aparecen, desde la perspectiva del controlador, como restricciones sobre el tratamiento de las representaciones sintácticas de información. El procesamiento de la información por el medio computacional tiene, por supuesto, también los aspectos semánticos y pragmáticos internos. Existen, por ejemplo, representaciones semánticas de información en la célula como el código orgánico que las estructuras de la expresión de la información genética en el plasmodio (Barbieri, 2003). Sin embargo, desde la perspectiva del controlador de aquellos aspectos internos de las células deben ser consideradas simplemente como limitaciones en la eficiencia de procesamiento de representaciones sintácticas de información que se actualizan en el entorno de la célula. Por lo tanto, la eficacia sintáctica del medio computacional se manifiesta en su versatilidad pragmática, es decir, el grado en que su comportamiento es capaz de adaptarse a las condiciones cambiantes límite que llevan información sintácticamente.

En segundo lugar, las subestructuras semánticas del controlador, los códigos utilizados para la codificación de los estímulos externos y para la decodificación de los datos de medición recogidos internamente, están conectado pragmáticamente por el comportamiento del medio computacional, es decir, cómo reacciona sensiblemente a los estímulos codificados. Codificar la información significa en relación con la pragmática que el dispositivo de control establece las condiciones límite sobre cómo el medio computacional procesa representaciones sintácticas de información. Decodificar la información significa que el dispositivo de control representa semánticamente los resultados pragmáticos del procesamiento de la información por el medio computacional. Esta interacción funcionalmente diferenciada de la semántica y la pragmática en el controlador es tan importante como la eficiencia sintáctica del medio computacional orgánica aislada, ya que es el medio por el cual la versatilidad pragmática de la célula también es detectable en el comportamiento del robot.

En tercer lugar, desde la perspectiva del medio computacional, el dispositivo de control es un amplificador de comportamiento. El comportamiento microscópico de una célula se amplifica para el comportamiento macroscópico de un robot por medio semántico. Esto sugiere que pensar en la generalidad de los códigos, es decir, sobre el grado en que son capaces de diferenciar entre posibles mensajes en ciertas condiciones límite pragmática, en términos la granularidad de los comportamientos entre los que los códigos implementados pueden diferenciar. Cuanto más finas son las diferencias de comportamiento de la célula que puede representar un código semánticamente, más general es el código con respecto a este ajuste de control particular.

Estas observaciones ponen de relieve algunas de las características de la interacción entre las representaciones sintácticas, semánticas y pragmáticas de la información en los sistemas informáticos no convencionales. Indican qué problemas de información teóricas existen, no sólo en el desarrollo ulterior del control del robot basado en plasmodio, sino también en cómo deben concentrar su atención en la construcción de una arquitectura general de los ordenadores convencionales.

### **La toma de decisiones: un paso biosemiótico imprescindible**

Para poder estudiar los fundamentos que subyacen en las conductas adaptativas de los organismos sin sistema nervioso, hemos de estudiar cómo se abren paso los procesos teleodinámicos que permiten a los organismos establecer equilibrios homeodinámicos entre el *umwelt* (entorno externo semánticamente identificado) y el *innenwelt* (mundo interno semánticamente identificado) para su supervivencia y su autopoiesis. Hemos visto que tanto a nivel molecular como a nivel celular, se establece determinadas semiosferas que permiten el procesamiento de la información dada a cada nivel. Queremos saber si también los procesamientos de información se dan entre niveles jerárquicos y si existe correspondencia entre ellos. Poder responder a esto nos permite fundamentar la conducta de los organismos y establecer algunos de los patrones que pueden permitir no sólo la adaptación, sino a escoger tanto el target u objetivo hacia la adaptación como los teleomecanismos que permiten la adaptación. Una posible respuesta se encuentra en la toma de decisiones que existen desde el nivel más elemental hasta el nivel celular y orgánico.

Las células de todos los reinos biológicos están continuamente ocupadas en el proceso de toma de decisiones. Por “toma de decisiones” nos referimos a tomar la información de su entorno tantointerno (*innenwelt*) comoexterno (*umwelt*) incluyendo las células vecinas, el procesamiento de estos datos a través de la transducción de señales complejas y circuitos genéticos, y la modulación de los fenotipos celulares en respuesta a la información procesada. Las decisiones implican que otras elecciones se transforman en opciones que compiten y que una vez hecho, estas elecciones tienen algún grado de persistencia, incluso cuando las condiciones cambien.

Gran parte del progreso en la comprensión de los circuitos que subyace en la toma de decisiones, así como las ventajas de la aptitud de la lógica estratégica subyacente implementada en el mismo, ha venido de sistemas bacterianos. Sin embargo, con el

renovado interés en la investigación basada en células madre para el tejido normal y los tumores malignos, hay un creciente interés en extender estos conceptos a contextos eucariotas y especialmente de mamíferos<sup>223</sup>.

Para nosotros es muy importante estudiar el enlace entre las tomas de decisiones en el nivel molecular – macromolecular y en el nivel celular – organismo. Estudiaremos primero si hay una posible interconexión con la semántica molecular y la semántica celular, es decir, si la toma de decisiones tienen su correlato con la semántica, la sintaxis y la pragmática biosemiótica; y segundo, si hay una causalidad descendente o ascendente en las tomas de decisiones, es decir si hablamos de un fenómeno emergente “top down” o “bottom up”. Como colofón final nos interesa relacionar las tomas de decisiones con el denominado “sense making” o el “dar sentido” en el organicismo cualitativo en la que englobamos la biosemiótica de los principios mínimos cognitivos.

### **La capacidad de memoria en la toma de decisiones: el caso de los interruptores moleculares**

Después de haber estudiado el proceso de mecanotransducción de señales en los organismos celulares en general, y en especificidad en los mixomicetos, hemos visto que la transducción de señales forma parte imprescindible del concepto de agencialidad de los organismos. Las transferencias de señales exógenas al organismo (Merkwelt) son transformadas en señales endógenas (Merkzeichen) dentro de los orgánulos receptores en el citoplasma o del propio núcleo celular (Merkorgan).

El “Merkwelt” – según la nomenclatura biosemiótica de Jakob von Uexküll – hace referencia a la suma de indicadores percibidos por los “órganos receptores” (Merkorgan) a través de los signos de percepción (Merkzeichen) provocando determinadas características sensitivas o sensaciones (Merkmale).

Es en este enclave donde querría hacer incapié en este trabajo. Como he dicho arriba, pasamos de la mecanotransducción de señales a una transformación de redes de procesamiento de información.

Veamos si la toma de decisiones a nivel del organismo, en la comunicación celular, tiene correspondencia de algún modo con los procesos bioquímicos de almacenamiento de información. Para ello estudiaremos la capacidad de memoria de los interruptores moleculares en un entorno intracelular de transducción de señales altamente no lineal.

Muchas y distintas vías de señalización permiten a la célula recibir, procesar y responder a la información. A menudo, los componentes de diferentes vías interactúan, dando lugar a las redes de señalización<sup>224</sup>. Estas redes presentan propiedades

---

<sup>223</sup> Cell Decision Making Workshop. 9 a 11 de junio 2013. Organizadores: Eshel Ben Jacob, Herbert Levine y Guro Suel. The National Science Foundation y The Center for Theoretical Biological Physics at Rice University. Ver: <http://physics.lifesciences.org/cdm/>

<sup>224</sup> Dichas redes de señalización fueron construidas con constantes bioquímicas obtenidas experimentalmente y se analizaron mediante métodos computacionales para entender su papel en los

emergentes tales como la integración de las señales a través de múltiples escalas de tiempo, generación de productos distintos en función de la fuerza de entrada y la duración, y la retroalimentación autosostenible por bucles. La retroalimentación puede darse en un comportamiento biestable – gracias a las constantes – con actividades en estado estacionario discreto, en umbrales de entrada bien definidos para la transición entre los estados, y en las señales de salida prolongadas como en sus modulaciones en respuesta a los estímulos transitorios. Estas propiedades de las redes de señalización plantean la posibilidad de que la información de los “comportamientos aprendidos” de los sistemas biológicos se puede almacenar dentro de las reacciones bioquímicas intracelulares que constituyen vías de señalización. Algo parecido a lo que habíamos establecido del comportamiento “buffer” de las enzimas como una capacidad cognitiva según Monod, a través de un factor de adecuación, o como yo denomino un encaje teleonómico dependiente de la biestabilidad de cada red como de su entramado.

Las redes que proponemos pueden jugar un importante papel en el potencial de largo plazo, un paradigma neural para algunos tipos de aprendizaje, y en la proliferación de “memoria”. Es posible que los enfoques similares, con otras vías de señalización, se puedan utilizar para explicar aspectos de recuerdos como el desarrollo inmunológico. En conclusión, estos estudios indican que las reacciones bioquímicas simples pueden, con acoplamiento adecuado, se utilizan para almacenar información. Por lo tanto – y esto es muy importante – las reacciones dentro de las vías de señalización pueden constituir un locus para la base bioquímica para el aprendizaje y la memoria.

Como bien sabemos, las células responden a los cambios en las propiedades físicas y químicas del entorno. Estos cambios incluyen alteraciones en la cantidad de nutrientes, factores de crecimiento, citoquinas, y la adhesión a la matriz celular. Como hemos visto anteriormente, las células responden a la estimulación física mediada por la osmolaridad, calor, pH, redox, la radiación y la tensión mecánica. Estas señales físicas y químicas controlan muchos aspectos de la función de la célula, incluyendo la migración, proliferación, diferenciación y muerte. El proceso de toma de decisiones que las células utilizan para montar una adecuada respuesta a un estímulo específico es fundamental para la vida normal. Muchas vías de transducción de señales cooperan y participan en este proceso<sup>225</sup>.

Actualmente sabemos que los mecanismos de transducción de señales intracelulares sustentan los procesos de toma de decisiones celular tales como la regulación de la división celular y la función de finalización de las células<sup>226</sup>.

La transducción de señales altamente no lineales<sup>227</sup> es omnipresente en las vías de señalización celular con el comportamiento tipo interruptor encontrado en varias

---

procesos biológicos complejos. Bhalla, U. S., Iyengar, R. (1998) *Emergent Properties of Networks of Biological Signaling Pathways*. Science. Vol. 283, pp. 381 – 387.

<sup>225</sup>Davis, R. J. (2000) *Signal transduction by the JNK group of MAP kinases*. Cell, Vol. 103, Issue 2, pp 239-252

<sup>226</sup> Wilks, A. F., Harpur, A. G. (1996) *Intracellular Signal Transduction: The JAK-STAT Pathway*. Molecular Biology Intelligence Unit. Springer. R. G Landes Company, Texas.

ocasiones. Un interruptor molecular es una molécula que puede ser revertida entre dos o más estados estables. Se encuentran dos tipos de interruptores: monoestables y biestables. Las moléculas pueden alternar entre dos estados en respuesta a cambios en, por ejemplo, el pH, la luz, la temperatura, una corriente eléctrica, el micro-contexto, o por la presencia de un ligando. En algunos casos, se emplea una combinación de estímulos para generar estados análogos a encendido y apagado. Un número de contextos en la señalización celular (por ejemplo apoptosis y el ciclo celular) implican transiciones esencialmente irreversibles y toma de decisiones. J. Krishnan y Chen Liu han proporcionado información detallada sobre cómo transiciones irreversibles pueden ser orquestadas a través de diferentes interruptores en la señalización celular, las características subyacentes de diseño, sus capacidades y limitaciones involucradas, y el grado en que estos interruptores se pueden distinguir sobre la base de toma de decisiones irreversibles para clases de entradas disponibles experimentalmente<sup>228</sup>.

En este tipo de interruptores moleculares, podemos observar una capacidad discriminativa semejante a las establecidas por Monod (denominada por él también como *capacidad cognitiva microscópica*), en una actividad coherente, orientada y constructiva, es decir teleonómica (Monod 1970; Kováč 2006a, 2006b).

Un interruptor molecular es una molécula que puede ser revertida entre dos o más estados estables. Las moléculas pueden alternar entre dos estados en respuesta a cambios en, por ejemplo, el pH, la luz, la temperatura, una corriente eléctrica, el micro-contexto, o por la presencia de un ligando. En algunos casos, se emplea una combinación de estímulos para generar estados análogos a encendido y apagado. La conmutación o interruptores en sistemas biomoleculares hacen referencia a respuestas sigmoidales – como las curvas de aprendizaje o funciones logísticas – a señales de entrada, denominada “ultrasensitividad” de mayor rapidez que la respuesta cinética de Michaelis-Menten para las reacciones enzimáticas, sobretodo en procesos irreversibles. Diagramamos que la ultrasensitividad reduce los ruidos de los efectores en cascada que interfiere en la transducción de señales, tanto en la membrana protoplasmática como en el interior del citoplasma celular en los umbrales de concentración de señales de entrada. Por lo que dichos interruptores actúan como buffers amortiguando por un lado pero almacenando memoria química. La acción de ultrasensibilidad se desarrolla matemáticamente a través de ecuaciones de reacción-difusión (Smith y colegas 2011)<sup>229</sup>, como la que vimos para la memoria química, al igual que en las fases de

---

<sup>227</sup> Se determinan a través de ecuaciones diferenciales de primer orden altamente no lineales.

<sup>228</sup> Krishnan, J., Liu, C. (2014) *An Investigation of Signal Transduction and Irreversible Decision Making Through Monostable and Bistable Switches*. En: Kulkarni, V. V., Stan, G-B., Raman, K. (eds.) *A Systems Theoretic Approach to Systems and Synthetic Biology II-Analysis and Design of Cellular System*. Springer. Cap. 9. pp. 219-243.

<sup>229</sup> Smith, E., Krishnamurthy, S., Fontana, W., Krakauer D. (2011) *Nonequilibrium phase transitions in biomolecular signal transduction*. *Physical Review E*, Vol 84, 051917. pp 1-19.

transición en el comportamiento de cooperatividad intermolecular, así como en ecuaciones de Hill donde se cuantifica la ultrasensibilidad (Ferrell Jr 1996)<sup>230</sup>.

La teoría del rápido desarrollo de las redes complejas, como las metabólicas, indica que las redes reales no son aleatorias, sino que tienen una arquitectura de gran escala altamente robusta, que se rigen por estrictos principios organizativos. Particularmente nos centramos en las propiedades de las redes biológicas, en la que se discuten actualmente de sus características “libre de escala” (modelo Barabási-Albert)<sup>231</sup> y jerárquicas.

### **La toma de decisiones biomolecular: el caso de los mecanotransductores y la mecanorecepción discriminadora de ruidos.**

Existen decenas de miles de insumos, los cuales se han podido analizar la dinámica de la combinatoria de múltiples salidas. Estos han revelado un robusto sistema capaz de agrupar ampliamente combinaciones variables de inputs en clases de equivalencia de respuestas celulares biológicamente relevantes (Helikar y colegas, 2007).

Es muy poco probable que la agencialidad en la toma de decisiones en entornos celulares en el mundo real tenga la simpleza de una retroalimentación lineal. En la vida real, las células viven con caos, ruidos y señales contradictorias. Esto es un sello distintivo de la toma de decisiones en el mundo real. Es por esto que no es nada trivial, puesto que se han de extraer de una forma nítida de una red fuzzy de ruidos añadidos.

La capacidad de las células individuales para procesar información y tomar decisiones no triviales tendría una ventaja evidente en términos de adaptación, pero también podría caracterizar una diferencia fundamental entre los sistemas no vivientes. Helikar y colegas proponen la hipótesis de que las redes de transducción de señales, como sistemas no triviales de toma de decisiones, requieren un enfoque de biología de sistemas, ya que es probable que la función de toma de decisiones sea una propiedad emergente de todo el sistema trabajando en concierto. La lógica de cada nodo (o "conjunto de instrucciones") del sistema debe ser tomada en cuenta de una forma completa. Esta red de transducción de señales es capaz de realizar patrones de reconocimiento no trivial, una actividad de alto nivel asociado con la toma de decisiones en el aprendizaje del modelo estudiado por Helikar y colegas. El patrón de reconocimiento no trivial implica la toma de decisiones basadas en la información de

---

<sup>230</sup>Ferrell Jr, J. E. (1998). *How regulated protein translocation can produce switch-like responses*. Trends in Biochemical Sciences 23 (12): 461–5

<sup>231</sup> Una red libre de escala es un tipo específico de red compleja. En una red libre de escala, algunos nodos están altamente conectados, es decir, poseen un gran número de enlaces a otros nodos, aunque el grado de conexión de casi todos los nodos es bastante bajo. El modelo de Barabási–Albert es uno de los propuestos para la generación de redes libres de escala. Incorpora dos conceptos generales: crecimiento y conexión preferencial (preferential attachment). Ambos conceptos pueden encontrarse extensivamente en las redes reales que nos rodean. La propiedad de crecimiento en teoría de redes significa que las redes poseen una cantidad de nodos creciente. (fuente: Wikipedia®)

Almaas, E., Barabási, A-L. (2006) *Power Laws in Biological Networks*, En: Koonin, E. V., Wolf, Y. I., Karev, G. P. (eds) *Power Laws, Scale-Free Networks and Genome Biology*. Molecular Biology Intelligence Unit. (2006) Springer. pp. 1-11.

entrada que no es necesariamente limpia o clara; es decir, tal como son la toma de decisiones en entornos del mundo real. Además de la capacidad de clasificar claramente incluso entradas relativamente indistintas, Helikar muestra que esta función de reconocimiento de patrones es robusta puesto que es capaz de realizar el reconocimiento incluso bajo condiciones de alto ruido. Todos estos resultados son una fuerte evidencia de que las redes de transducción de señales intracelular tienen funciones emergentes que son características de un sistema de toma de decisiones no trivial. Los resultados muestran que la red de transducción de señales agrupa la gran mayoría de entradas en un pequeño número de respuestas biológicamente apropiadas. En esta partición no fuzzy de un espacio de insumos de carácter aleatorios, ruidosos y caóticos en un pequeño número de clases de equivalencia es un sello distintivo de un mecanismo de reconocimiento de patrones, y una fuerte evidencia de que la señal de transducción de redes son sistemas de toma de decisiones que procesan la información obtenida de la membrana, y no pasando simplemente las señales no modificadas hacia el interior del citoplasma.

Una célula individual se enfrenta con cualquier número de estímulos en forma de ligandos químicos que se unen a sus receptores de la superficie celular. Estos receptores variaron en el tipo y número, y forman un sistema sensorial que permite a una célula detectar y responder a su Umwelt (entorno semánticamente identificado). Teniendo en cuenta que cualquier medio físico, su Außenwelt (entorno semánticamente no identificado en su total percepción semiótica) es caótico, ruidoso, y, a veces, contradictorio, es claro que las células necesitan la capacidad de tomar decisiones basadas en este tipo de insumos y que su supervivencia depende de esa capacidad.

Por lo que podemos establecer que los organismos unicelulares, por ejemplo, ofrecen una capacidad discriminadora de los ruidos, pudiendo no solo reconocer patrones semánticos y pragmáticos moleculares, sino que también es capaz de discriminar a qué circuitos funcionales pertenecen dichas transducciones. Esto es fundamental para poder establecer un carácter autoorganizativo del organismo celular a nivel intracelular, para después ofrecer y recibir comunicación discriminativa intercelular<sup>232</sup>. De esta forma estamos asistiendo a una descripción de unas competencias celulares de procesamiento informativo que abren nuevos horizontes de los teleomecanismos agenciales, que hemos denominado teleodinámicos y que fundamentan los patrones de los principios cognitivos mínimos.

### **La semántica celular de la toma de decisiones**

Los circuitos funcionales de transducción de señales que fundamentan la toma de decisiones intra e intercelular y su capacidad discriminadora estudiada por Helikar y colegas han de estar enlazados, a fortiori, a la semántica molecular de Görlich, Artmann, y Dittrich que hemos visto anteriormente. La capacidad de transducir señales

---

<sup>232</sup> Aún así, el resultado de la toma de decisiones para células individuales es, *a priori* desconocido. Balázs, G., Oudenaarden, A. v., Collins, J. J. (2011) *Cellular Decision-Making and Biological Noise: From Microbes to Mammals*. Cell. Vol. 144, N° 6, pp. 910–925.

para tomar decisiones a nivel molecular está basada en la información genética y/o epigenética que permite la sintaxis, la semántica y la pragmática molecular, es decir la biosemiosis molecular específica en dos niveles de despliegue o de decodificación. Primero en una superación homeodinámica de la inercia entrópica donde se reorganiza macromolecularmente los agentes intracelulares involucrados en los procesos de transducción – sean orgánulos como membrana celular – tanto en su morfodinámica como en su funcionalidad adaptativa de las condiciones de su entorno cambiante. Después de este proceso de reorganización recursiva de su estabilidad morfodinámica viene la optimización funcional teleodinámica donde los procesos pragmáticos de la semiosis molecular son el fundamento de la discriminación de las señales que participan en uno u otro circuito funcional de transducción de señales, así como el reconocimiento de los enlaces entre estos circuitos.

Podemos poner como ejemplo de correlación de moléculas entre ciclos funcionales la calmodulina para la glucólisis, y la correlación entre ciclos como la glucólisis con el ciclo de Krebs, sin que exista una transitividad funcional de la calmodulina con el ciclo de Krebs de forma directa (aquí la discriminación funcional y, por lo tanto pragmática desde el punto de vista de la semiosis molecular). Por otro lado también podemos correlacionar la semejanza morfológica de la calmodulina con la troponina C – en un 70 % – y su relación con la sincronización de la contracción de la actina, fundamental para las células musculares<sup>233</sup>, gracias a su capacidad de unir dos iones calcio  $Ca^{2+}$ . Dichos iones calcio actúan como segundo mensajeros para múltiples funciones como activar el movimiento de cilios y flagelos, o también a las proteínas G que son también transductores de señales fundamentales que, a su vez activan otros segundos mensajeros como el AMPc, etc (discriminan semánticamente en cada momento la pragmática en función de la sintaxis de los códigos moleculares). La actividad de la calmodulina y de la troponina C como generadoras de  $Ca^{2+}$  no tiene correlación con las múltiples funciones de los iones calcio cuando actúan como segundo mensajero. Pero cuando los iones calcio se presentan como bombas (denominadas PMCA<sup>234</sup>) su unión con la calmodulina aumenta la actividad de la bomba (una coordinación semántica de cada sintaxis ofrece una pragmática de los códigos genéticos de cada proteína). Por otro lado se ha determinado que la PMCA interactúa con la actina del citoesqueleto.

---

<sup>233</sup> Como también para los movimientos oscilatorios de los mixomicetos. Pero no se ha encontrado en protistas ni calmodulina ni troponina C. Pero mientras en las células musculares la actina se une a la tropomiosina, a la troponina c y a la miosina (actomiosina), en los mixomicetos la unión se configura únicamente en actomiosina.

<sup>234</sup> La bomba de calcio de membrana plasmática (PMCA por sus siglas en inglés) es una proteína que tiene la capacidad de transportar calcio en contra de su gradiente electroquímico desde el citoplasma hacia el espacio extracelular. Pertenece a la familia de las ATPasas de tipo P que tienen en común la capacidad de transportar cationes de un lado al otro de la membrana, acoplando la hidrólisis de una molécula de ATP y generando un intermediario fosforilado estable en medio ácido en su ciclo de reacción. Mangialavori I.C.; Ferreira-Gomes M.S.; Saffioti N.A.; Gonzalez-Lebrero; Rossi R.C.; Rossi J.P. (2013). *Conformational Changes Produced by ATP Binding to the Plasma Membrane Calcium Pump*. Journal of Biological Chemistry, N° 288, pp. 31030–31041.

La PMCA está presente en todos los organismos eucariontes. Algunas formas de la PMCA son esenciales para la vida, otras son necesarias para el sentido de la audición y el equilibrio tanto en vertebrados como invertebrados.

## Emergencia en la semántica molecular y en la toma de decisiones

Después de haber estudiado las bases de la semántica molecular y de la semántica celular, en paralelo con la toma de decisiones macromoleculares y las toma de decisiones de los organismos individuados (sean protistas hasta seres humanos) se ha realizado en paralelo con el fin de ver factores semejantes en cuanto lo estudiamos sobre una teoría de niveles. Es decir, queremos hacernos la pregunta sobre la posibilidad de superveniencia / subveniencia de la semántica molecular sobre la semántica celular, al igual que la toma de decisiones macromoleculares sobre la toma de decisiones de los organismos. Podemos comprender que no se ha llegado a un nivel de completitud en el estudio de un organismo (aunque sea sencillo) y cada posible toma de decisión que macromolecularmente se origina a lo largo de la vida del mismo. Es más fácil observar la toma de decisiones del propio organismo y ponerlo en pruebas continuas donde la supervivencia dea el factor clave que origine una decisión. Sería interesantísimo realizar un estudio sobre la implicación de la semántica molecular sobre la semántica celular para ver si los factores de sintaxis de un nivel jerárquico macromolecular puede ejercer una restricción semántica en un nivel inmediatamente superior. O si existen conexiones sintácticas entre niveles que ejerzan influencia pragmática, con una semántica “vertical” frente a la “horizontal” o del mismo nivel jerárquico. Incluso podemos pensar de semánticas cruzadas entre diferentes ciclos funcionales de diferente nivel de complejidad que tengan incluso una interrelación de aprovechamiento de péptidos libres que se acojen en otros circuitos funcionales independientes tanto funcionalmente como bioquímicamente entre sí, por ejemplo. El caso es que si hay algo que se puede ejemplificar sería a los nucleótidos, donde intervienen en ciclos y circuitos tanto interdependientes como independientes, de múltiples niveles de jerarquías intraorgánicas manteniendo semánticamente la identidad pragmática. Pero también podemos encontrarnos con contingencias (Görlich y Dittrich 2013), es decir que la relación entre los signos y significados podría ser diferente, por lo tanto la relación no está determinada por los signos y significados unicamente. En particular, esto implica que las leyes naturales permiten derivar la relación sólo conociendo el contexto bajo el cual las señales son interpretadas.

Rol	Códigos de regulación de genes	Códigos genéticos	Códigos cascada de fosforilación
<b>Signos</b>	factores de transcripción	Los codones de ADN y / o ARNt descargadas	alta concentración de quinasas y / o fosfatasas
<b>Significados</b>	productos génicos	aminoácidos	alta / baja concentración de moléculas diana
<b>Contextos moleculares</b>	ADN con el promotor y la región codificante	ARNt cargados o una combinación de los ARNt cargados, alanil-ARNt sintetasa(aaRSs) y codones	quinasas y / o fosfatasas

Fig 19. Descripción general de la interpretación semiótica de los sistemas biológicos encuestados. Fuente: Görlich, D., Dittrich, P. (2013) *Molecular Codes in Biological and Chemical Reaction*.

Entonces ¿Cómo se mide la capacidad semántica de un sistema bioquímico real? Görlich y Dittrich sugieren un procedimiento que consta de tres pasos principales: Paso 1: Definir el sistema para ser estudiado y su química, Paso 2: Obtener la red de reacción mediante experimentos físicos, y Paso 3: Calcular todos los códigos moleculares de la red. Este enfoque proporciona una nueva forma de analizar los aspectos de las capacidades de procesamiento de la información de sistemas moleculares, lo que podría contribuir a la comprensión de información biológica en el contexto del origen y evolución de la vida, la señalización celular, o sistemas de computación moleculares sintéticos.

Podemos observar que no nos hemos salido de un desarrollo mereológico para una descripción holística de la coordinación u orquestación semántica intracelular. Ésta es nuestra posición también al respecto de la emergencia de grados de toma de decisiones que van desde los propios interruptores biomoleculares – desarrollando ciclos celulares, como en el proceso de mitosis y otros ciclos funcionales de retroalimentación – hasta la consecución conductual de un organismo a la hora de sobrevivir de las condiciones del entorno.

Par poder realizar un estudio de las relaciones homeopragmáticas entre diversos niveles de semántica o de toma de decisiones, hemos de comprender la posibilidad que hay de construir perfiles conceptuales que permiten modelos más potentes y fértiles de la heterogeneidad de las formas de pensar y de observar los fenómenos funcionales en la biología (actualmente llamado funcionalismo intra-orgánico). Es decir, somos los investigadores de diferentes disciplinas biológicas y científicas en general los que, aplicando criterios multi, inter y transdisciplinarios, construimos la explicación de la realidad biológica, es decir epistémicamente, para comprender lo que hay ontológicamente. Y en este campo la biosemiótica procede a integrar todos estos criterios para proceder al estudio de la información biológica con contenido semántico traspassando las fronteras formales de Shannon al respecto, aunque sin obviarlos por supuesto.

Más en el caso de la semántica molecular, no se trata únicamente de un proceso de reductibilidad físico-química. La semántica es en sí un fenómeno emergente surgido de la combinatoria sintáctica de las reacciones bioquímicas y las relaciones entre signos y significados. Por ejemplo en un código genético está la relación entre codones y aminoácidos. Por lo que el concepto de código tampoco es reductible a la físico-química, puesto que en otro contexto el código cambia de interpretación. Por eso podemos hablar de fenómenos emergentes que no surgen de una disposición jerárquica ni “top-down” ni “bottom up”. Se da la emergencia en el estrato molecular, y acompaña a los procesos bioquímicos en la conducción de su pragmática evolutiva de nuevas reacciones en nuevos contextos, así como los símbolos ofrecen una interpretación diferenciada según el entorno en que se encuentra. La biosemiótica se aproxima a la biología molecular para ofrecer informaciones específicas y sentidos o interpretaciones inequívocas a los procesos biomoleculares que emergen de las leyes de la naturaleza, pero que no se pueden reducir a los fenómenos físico-químicos (Patee, 2008). Los

contextos moleculares generan contingencias específicas. Es en estas contingencias donde se concentran las condiciones interpretativas de los códigos moleculares. Es por eso que en el caso de la quimiotaxis, tanto bacteriana como en los plasmodios mucilaginosos, las contingencias del entorno provocan un proceso de regulación de las señales biomoleculares donde se multiplican las variables de procesamiento de información (haptotaxis, gravitotaxis –y sus consecuencias preformativas moleculares– fototaxis, etc.) en el que el organismo *toma una decisión*, fruto de la necesidad de supervivencia, pero gracias a la sensibilidad hacia la resultante semiótica dominante entre todas las condiciones constrictivas o contingencias exo e intro orgánicas. Es decir, las interacciones semánticas de las moléculas en cada circuito funcional del organismo –sea protista o bacteriano– provocan diversas resultantes que bascularán en función de las variables moleculares del entorno y la semántica transducida por las señales que van desde la membrana extracelular hacia el citoplasma y de allí al núcleo o núcleos donde se genera otro proceso semiótico transcriptor de códigos moleculares.

La relación entre la semántica molecular y la de la toma de decisiones radica en la capacidad del organismo o a computar las señales por motivos de acumulación de información (procesada o no) o a *tomar sentido*– semántico – a los procesos regulatorios formativos que le permite comunicarse con su interior y con el entorno que decodifica, que transduce, que transfiere y transforma tanto sintácticamente (por meros enlaces químicos) como pragmáticamente (por su uso en cada proceso). Por lo que podemos desprender de esto que pasamos a una fase biosemiótica muy importante de los organismos mínimos, en los que las semánticas celulares *supervienen* a las semánticas moleculares, así como que de las semánticas moleculares *subvienen*<sup>235</sup> la toma de decisiones de las macromoléculas complejas, como las enzimas que conforman los interruptores moleculares, que intervienen o no en las tomas de decisiones de los organismos; y que dichas tomas de decisiones de los organismos pueden en muchos casos *tomar sentido* (Wadhams, Armitage 2004) en los procesos tanto de supervivencia de la especie, de su ontogenia, como entre diversas especies compartiendo nichos

---

<sup>235</sup>En una relación de superveniencia donde el conjunto A superviene sobre el conjunto B, las propiedades del conjunto A se dice que son las propiedades supervenientes, mientras que las propiedades del conjunto B se dice que son las propiedades subvenientes. Las propiedades subvenientes a veces se llaman propiedades base, propiedades basales o propiedades subyacentes. Para entender de una forma simple, aunque no completa el caso de la subveniencia, podemos establecerla de esta manera: un factor S puede ser causa eficiente de dos factores de nivel jerárquico superior X e Y aunque sus causas funcionales entre ellas no tengan relación alguna. El hecho en lingüística de una metáfora es causa eficiente de un giro lingüístico literario o de una explicación comparativa de una reflexión, aunque su causa material, las palabras, sean diferentes. Mutatis mutandis la semántica molecular de ciertas reacciones químicas (como una fosforilación) es causa eficiente en este caso de la emergencia de dos ciclos funcionales diferentes y sin relación (una glucólisis y la fotosíntesis, por ejemplo) aunque sus causas materiales se desencadenen en dos moléculas diferentes (la hexoquinasa para la glucólisis y la ATP-asa para la fotosíntesis). Tanto la metáfora en un caso como la fosforilación en el otro caso subvienen a causas funcionales de relación contingente. Tanto las enzimas como las palabras estarían en un nivel jerárquico de la causa material semióticamente molecular, mientras que las letras y los átomos estarían en un nivel semióticamente atómico de la causa material. Como dice Ned Block, “la propiedad subveniente es una configuración mereológica específica de propiedades en lugar de una sola propiedad. Como señala Jaewok Kim, la propiedad superveniente por lo tanto tiene propiedades causales no poseídas por cualquier miembro individual de la configuración subveniente.” Block, N. (2003) *Do Causal Powers Drain Away?* Philosophy and Phenomenological Research LXVII, 1, pp. 110-127.

ecológicos (con o sin relación filogénica) generando de ese modo un *nicho semiótico* fundamental (Hoffmeyer, 2008) que le permite establecer un Umwelt en continuo homeodinamismo. De este modo consigue el organismo en su Umwelt dos objetivos fundamentales: generar una *semioesfera* donde participan todos aquellos organismos que comparten total o parcialmente las redes semióticas (de señales) que lo confieren y, sobre todo, permitir la supervivencia de patrones de información (Hoffmeyer, 1996). Parafraseando a Terrence Deacon<sup>236</sup>, “la computación solo transmite ligaduras impuestas extrínsecamente de un substrato a otro, mientras que la cognición (*semiosis*) genera ligaduras intrínsecas que tienen la capacidad de propagarse y autoorganizarse” (Deacon, 2013: 507).

### **De la toma de decisiones a la toma de sentido.**

Ahora bien, este paso tan excepcional de establecer de forma límpida determinadas tomas de decisiones han de ir acompañadas inexorablemente a una capacidad de dar sentido a dichas tomas de decisiones. Este paso de “decisión making” a “sense making” es un factor profundamente biosemiótico en tanto que del flujo de recepciones de señales que ofrecen en los organismos simples condiciones para reaccionar sobre el entorno (sea para huir de elementos hostiles, o para fagocitar alimentos o elementos patógenos) han de estar acompañados de una toma de sentido que referencia la decisión. Dicha toma de sentido puede provenir o de una orden genética (en el caso de un sistema inmunológico, por ejemplo) o de una conducta adaptativa emergente (en el caso de huir de un entorno con pH o una temperatura fuera del entorno de los umbrales de supervivencia).

Consideremos por ejemplo, la motilidad de las bacterias nadando cuesta arriba en un gradiente de alimentos de azúcar (Thompson 2007, pp 74-75, 157-158; Varela 1991). Las células van desordenadas nadando hasta que llegan a una orientación que aumenta su exposición al azúcar, momento en el que nadan hacia adelante, hacia el gradiente creciente, hacia la zona de mayor concentración de azúcar. El azúcar es significativo para estos organismos y más de ella es mejor que menos, debido a la manera en que su metabolismo se da cuenta químicamente su organización autónoma. La importancia y el valor del azúcar no son intrínsecos a las moléculas de azúcar; son características relacionales, ligados a las bacterias como unidades autónomas. El azúcar tiene importancia como alimento, pero sólo en el medio que el propio organismo enactúa a través de sus dinámicas autónomas.

Este ejemplo ilustra que incluso los organismos más simples regulan sus interacciones con el mundo de tal manera que transforman el mundo en un lugar de relevancia, el significado y valor en un entorno (Umwelt) en el sentido biológico adecuado del término. Esta transformación del mundo en un entorno pasa a través de la actividad de

---

<sup>236</sup> Aunque Deacon no expone su tesis cognitiva en organismos sin sistema nervioso, su conceptualización de la sentiencia es aplicable (en un sentido aún vegetativo para dichos organismos) aunque incompleto (como el título que da a su libro) en la capacidad de la actividad sensoriomotor que conforma sensibilidad con toma de decisión (tanto en eucariotas protistas como en procariotas).

toma de sentido del organismo. Esto lo veremos más adelante en los mixomicetos y cómo son capaces de encontrar su alimento, tomar decisiones irracionales incluso de tener memoria espacial.

Tomar sentido es la parte interactiva y relacional de la autonomía. Un sistema autónomo produce y mantiene su propia identidad en condiciones precarias y con ello establece una perspectiva desde la que la interacción con el mundo adquieren un estatus normativo. Ciertas interacciones facilitan la autonomía y otras interacciones degradan. En palabras de Merleau-Ponty: “cada organismo, en presencia de un medio dado, tiene sus condiciones óptimas de actividad y su adecuada forma de realizar el equilibrio”, y cada organismo “modifica su entorno de acuerdo con las normas internas de su la actividad”<sup>237</sup>. Tomar sentido es el comportamiento o conducta en relación con la importancia del medio ambiente y de su válua, que el propio organismo promulga o produce sobre la base de su autonomía (Thompson y Stapleton 2009).

Si optamos por llamar cognitivo o proto-cognitivo la toma de sentido en bacterias y en mixomicetos es algo que tenemos que discutir unos capítulos más adelante. Lo que interesa comprender ahora es que un organismo vivo es un sistema capaz de relacionarse cognitivamente al mundo ya que es un sistema de toma de sentido, y es un sistema de toma de sentido por ser un sistema autónomo.

Las bacterias son los tipos más simples de los organismos vivos y que exhiben tanto autopoiesis y el sentido de decisiones. Pero su sentido de decisiones no puede derivarse simplemente de su ser autopoietico, por mera autopoiesis no es suficiente para la construcción de sentido (Bitbol y Luisi 2005; Bourguine y Stewart 2004; Di Paolo 2005, Thompson 2007). Más bien, como Di Paolo (2005) ha comentado, tiene que ser añadida la *adaptabilidad* a la autopoiesis para generar toma de sentido.

Como habíamos visto anteriormente, la autopoiesis – la auto-producción operacionalmente cerrada de una red químicamente acotada – proporciona sólo la conservación de todo o nada de la identidad a través de rotación de los materiales y las perturbaciones externas al sistema, pero no la regulación activa de las interacciones con el mundo exterior.

La toma de sentido, al igual que la toma de decisiones, es normativa, pero la única norma que la autopoiesis puede proporcionar es la norma de todo o nada de autocontinuación, no las normas graduadas de la vitalidad (la salud, la enfermedad, el estrés, la fatiga) que implica la regulación de su actividad de un organismo de manera que mejorar sus condiciones de autonomía (como cuando una bacteria, un paramecio o un mixomiceto nada hacia un gradiente de sacarosa o nada lejos de una sustancia nociva). Un sistema autopoietico de adaptación, sin embargo, es el que puede regular sus estados con respecto a sus condiciones de viabilidad en su entorno y con ello

---

<sup>237</sup> Merleau-Ponty M (1963) The structure of behavior (trans: Fisher A).Dusquene University Press, Pittsburgh, PA. pp,148-154.

modificar su entorno significativo – su Umwelt – de acuerdo con las normas internas de su actividad (Di Paolo 2005).

La autopoiesis y la adaptabilidad son conjuntamente suficientes para la toma de sentido, pero la mera autopoiesis es insuficiente. Ahora podemos decir que lo que se requiere es una especie de autonomía para la toma de sentido, para la toma de decisiones y para la cognición. Lo que se requiere, como dice Thompson (2009) no es la autopoiesis, sino la autonomía de adaptación. En los organismos sencillos como procariotas y protistas la autonomía adaptativa toma la forma de la autopoiesis adaptativa.

### Conclusiones

Hemos visto que la toma de decisiones no sólo corresponde principalmente en los organismos y en los seres vivos complejos, también reside en los procesos fisiológicos donde la información del entorno y del mundo interno del organismo toma papeles fundamentales para la supervivencia. En un organismo sencillo como en los mixomicetos, por ejemplo, los procesos de toma de decisiones vienen condicionados por la superveniencia de este fenómeno en estratos jerárquicos elementales, tanto en la membrana como en el citoplasma. Dicha superveniencia es un hecho emergente de una causación ascendente donde cada subnivel celular a macromolecular subyace dichos fenómenos que configuran los fundamentos mínimos cognitivos que veremos en profundidad en el siguiente capítulo. La memoria química y la capacidad almacenadora como amortiguadora en niveles enzimáticos resuelven un papel fundamental de la transducción de señales y determinan las bases jerárquicas de la toma de sentido de determinadas decisiones intraorgánicas. Pero también son propiedades emergentes en el nivel jerárquico de las redes y ciclos funcionales básicos de otras propiedades emergentes surgidas en niveles superiores de otros organismos superiores que comparten isotipos de composiciones estructurales como la tubulina y la actina en los mixomicetos, así como en las neuronas de cerebros de mamífero<sup>238</sup>. Esto fundamenta no sólo las posibles conexiones filogenéticas entre los organismos protistas primitivos y los mamíferos, sino también la funcionalidad pareja, es decir, la capacidad de que los componentes comunicativos de señales de amebas, mixomicetos incluso en plantas (Baluška, Volkmann y Menzel 2005; Baluška y Mancuso 2007, 2009) y neuronas funcionen como un sistema nervioso en sí (un sistema nervioso dentro de la neurona simple). No estamos hablando desde una semántica metafórica únicamente, sino sobretudo desde una semántica biosemiótica que compara funcionalidades que se han hecho evidentes experimentalmente al aplicarse en células artificiales e IA computada por mixomicetos como el *Physarum polycephalum* (Adamatzky 2007; Adamatzky y Jones 2009; Jones 2015; Zhang, Adamatzky, Yang, Yang, Mahadevan, Deng 2015)

---

<sup>238</sup> “These experiments suggest an analogy between the  $\beta$ -tubulin of brain and the  $\alpha$ -tubulin of *Physarum myxamoebae*”. Clayton, L. et al. (1980) *A comparison of tubulins from mammalian brain and Physarum polycephalum*. FEBS Letters. Volume 115, number 2, pp. 301-306.

## Capítulo 5. Fenomenología de la Biología Cognitiva

### Antecedentes históricos

Para presentar un programa de estudio consistente sobre la cognición en organismos sin sistema nervioso, primero debemos hacer una mirada hacia atrás, a la historia de la biología celular. En el comienzo del estudio celular, el comportamiento de los infusorios (como eran llamados los seres unicelulares en su momento) sorprendieron a la comunidad científica del último tercio del siglo XIX y comienzos del XX. Veamos brevemente porqué y las conclusiones que se llegó en ciertos momentos ante la evidencia que se les mostraba ante sus ojos.

Uno de los intereses a desarrollar en este trabajo está en constatar este nivel de conducta que se desarrolla a través de y por encima de los tropismos, para confeccionar una condición epistemológica del concepto de proceso cognitivo y de inteligencia desde la biosemiótica. Esta reflexión tuvo su apoyo en biólogos de la talla de Jakob von Uexküll, Ernst Haeckel, Rudolf Virchow, Max Verworn, Alfred Binet, Herbert Spencer Jennings entre otros. Todos ellos, no hicieron referencia directa del concepto de cognición, pero sí del estudio de una cierta “psique” en los organismos protoplasmáticos, en los seres unicelulares en general. Cada uno aportó ciertas referencias a un desarrollo “psico-fisiológico” y “psico-físico” que, aunque el neodarwinismo arrasó en los círculos científicos ante la desafortunada desacreditación del vitalismo, sus concepciones fundamentales siguen siendo de gran ayuda para analizar la condición de posibilidad de la cognición en los organismos sin sistema nervioso. Sorprendentemente tienen vigencia ante la falta de instrumentación de su momento con respecto a la que existe en la actualidad. Sostuvieron grandes luchas entre las evidencias experimentales y las interpretaciones de dichas evidencias que rompían con el automatismo mecanicista, pero que tampoco podían ofrecer un tipo de consciencia y libre albedrío antropomórfico inadecuado y desproporcionadamente no científico.

### Inicios de la teoría celular

Como es bien sabido, los investigadores comenzaron a recurrir a estas asociaciones históricas entre la individualidad y protozoos en el contexto de la teoría celular emergente. En la década de 1820 y 1830 los botánicos como Pierre Turpin, Franz Meyen, y Matthias Schleiden argumentaron que las plantas son federaciones de seres independientes o “células” que, contrariamente a las afirmaciones de uno de los más sobresalientes representantes de la Naturphilosophie, Lorenz Oken, conservan su individualidad dentro del todo: pueden vivir en el aislamiento y son la fuente de su propio crecimiento y propagación.<sup>239</sup> Estas ideas culminaron en la teoría celular

---

<sup>239</sup> Lorenz Oken, *Die Zeugung* (Bamberg / Wirzburg: Goebhardt, 1805), esp. pp. 22-23. Para un lector alemán, Oken habría parecía haber estado jugando con la palabra alemana "Bestandteil", que significa "componente" o "elemento", con su elección de la palabra inusual "Bestandthiere". En Schloegel, J. J., Schmidgen, H. (2002) *General Physiology, Experimental Psychology, and Evolutionism. Unicellular Organisms as Objects of Psychophysiological Research, 1877-1918*. Isis, N° 93, pp. 614-645, esp. p. 620.

avanzaron en 1839 por Theodor Schwann, que encuentra los fenómenos vitales no en la “totalidad del organismo”, como fue ampliamente asumido, sino en las propias células. Aunque los aspectos específicos de la teoría celular fueron objeto de una revisión considerable durante las próximas dos décadas, Schwann aseguró la identidad de la célula como un ser vivo independiente que poseía una “vitalidad independiente”, es decir, era capaz de crecer y asegurar su propia nutrición.<sup>240</sup>

La visión dinámica de la célula como individuo, defendido por Schwann y Rudolf Virchow entre otros, facilitaron una creciente percepción de que los protozoos, y también sentaron a horcajadas sobre la frontera entre las células y los organismos. Esta transformación – indican Schloegel y Schmidgen (2002) – se inició en la década de 1840 a mediados, cuando Carl Theodor von Siebold y Ernst Albert von Kölliker llegaron a la conclusión por razones morfológicas de las células de protozoos que estos eran unicelulares. Siebold invocó, además, la nueva teoría celular para sostener que la analogía dibujado por Schwann entre las células vegetales y animales fortaleció su propia analogía entre infusorios<sup>241</sup> y “células simples”.

Tales afirmaciones sobre la unicelularidad de protozoos tuvieron poco efecto inmediato, sin embargo, los investigadores protozoológicos quedaron preocupados durante las siguientes tres décadas con las ideas del naturalista Christian Gottfried Ehrenberg<sup>242</sup> desde Berlín, quien abogó por una doctrina de infusorios como “organismos completos”. La insistencia de Ehrenberg en que los protozoos poseen sistemas de órganos completos como los de organismos superiores alentó a la suposición implícita de que los protozoos deben ser múltiples en lugar de unicelulares. Al mismo tiempo, sin embargo, Ehrenberg afirmó que los protozoos no sólo eran fisiológicamente completos sino que también estaban dotados psicológicamente. Mientras que la primera interpretación se volcó en la década de 1870, esta última idea sería quedarse, como veremos más adelante, hasta el final del siglo XIX.

En la década de 1870 nuevas pruebas y argumentos culminaron en la aceptación gradual que los protozoos unicelulares eran de hecho. A partir de 1873, Ernst Haeckel propuso

---

<sup>240</sup> Theodor Schwann, *Microscopical Researches into the Accordance in the Structure and Growth of Animals and Plants*, trans. Henry Smith (London: Sydenham Society, 1842), pp. 191–215. En Schloegel, J. J., Schmidgen, H. Op. Cit. p. 620.

<sup>241</sup> El término popular “infusorios” o “animales de infusión” surgieron de la sabiduría común de que estos organismos se encuentran en la hierba o infusiones de heno; en el siglo XIX, el término se refiere a un subgrupo de los protozoos que hoy se conoce como los “ciliados”. El término “protozoos”, o la palabra alemana “*Urthiere*” designado, de acuerdo con su etimología griega, “primitivo” o “primeras vidas” (*Protón- Zoón*). En su *Generelle Morphologie der Organismen* (Berlín: Reimer, 1866), Ernst Haeckel introdujo el concepto de base evolutiva de “protistas”, que significa “los que vinieron por primera vez en el tiempo”. El término de Haeckel se utiliza hoy en día para referirse a aproximadamente doscientos mil especies de algas unicelulares eucariotas su mayoría, los hongos “inferiores”, y protozoos. Lynn J. Rothschild (1989) *Protozoa, Protista, Protoctista: What's in a Name?* *Journal of the History of Biology*, N° 22, pp. 277–305.

<sup>242</sup> Christian Gottfried Ehrenberg, “*Die Infusionsthierchen del als vollkommene Organismen: Ein Blick in das tiefere organische Leben der Natur*” (Leipzig: Voss, 1838). Sobre la recepción crítica de la hipótesis de protozoos unicelulares por T. H. Huxley, en el contexto británico, ver Marsha L. Richmond, “*T. H. Huxley's Criticism of German Cell Theory: An Epigenetic and Physiological Interpretation of Cell Structure*”. *J. Hist. Biol.*, 2.000, N° 33: pp. 247-289. Schloegel, J. J., Schmidgen, H. Op. Cit. p. 621.

que los ciliados conductualmente y morfológicamente complejos son organismos unicelulares, destacando, como Siebold antes que él, los paralelismos entre protozoos y núcleos celulares. Tres años más tarde, Otto Bütschli cimentó esta concepción de la unicelularidad de los infusorios con investigaciones microscópicas comparativas que acentuaron aún más los paralelismos fisiológicos entre protozoos conjugador y células en división. Los argumentos de Bütschli provocaron un intenso debate y la investigación, de la que llegó a un consenso de que los protozoos son organismos unicelulares. La comprensión de que los protozoos ocuparon la coyuntura de organización entre las células y los organismos individuales sentó las bases para su utilización como modelos de células, y la transformación de la fisiología en general en una empresa productiva experimental a finales de los siglos XIX y XX. El reconocimiento de la doble condición de protozoos como las células y organismos también provocó la contemplación de una psicología de las células y los protozoos.

### **Hacia una teoría psicológica de la célula: Ernst Haeckel**

Al frente de la empresa para desarrollar una psicología celular fue Ernst Heinrich Philipp August Haeckel (1834-1919), quien esbozó su programa para la investigación psicológica sobre las células y protozoos en la sesión inaugural de la reunión quincuagésimo de la Sociedad Alemana de Naturalistas y Médicos en Munich en 1877. El punto de partida de Haeckel del programa era su filosofía del monismo evolutivo, que postuló la unidad de la mente y la materia. En su conferencia Haeckel sostuvo que la consecuencia obvia de la teoría de la evolución es que la totalidad de la materia orgánica se haya “dotada de alma” (beseelt), es decir, que poseía una vida psicológica.<sup>243</sup> Recientes investigaciones microscópicas, explicó, demostraron que la sede de esta era la vida de la célula. Siguió a esta afirmación con un catálogo de las contribuciones más destacadas a las concepciones de la vida celular: citó Schleiden y Schwann para establecer que los elementos anatómicos de los organismos, las células, poseen una vida individual y autónoma (individuelles Selbständige Leben); evocando de Brücke “organismos elementales”. También sostuvo que las células son “verdaderos individuos de primer orden”, idea que había expresado por primera vez en su *Generelle Morphologie* en 1866; y explicó que las células se debían de entender no como bloques de construcción pasivos, sino “como la vida y ciudadanos activos” del Estado organicista, como Virchow había mostrado. Esta interpretación, continuó, fue, sin duda, corroborada por investigaciones de infusorios, amebas y otros organismos unicelulares, ya que “aquí nos encontramos con las células individuales aisladas de vida las mismas expresiones de la vida psicológica [Seelenleben], la sensación y la representación, la voluntad y movimiento, al igual que con los animales superiores, compuesto de muchas células”. Concluyó su breve resumen especificando además que Seelenleben de la célula estaba sentado en el protoplasma y que las moléculas del protoplasma, la Plastidulae, son los factores fundamentales de la vida psicológica en el mundo orgánico.

---

<sup>243</sup> Haeckel, E. (1877) *Die heutige Entwicklungslehre im Verhältnisse zur Gesamtwissenschaft*. Stuttgart, E. Schweizerbart's verlagshandlung, p. 12.

En una conferencia pronunciada en Viena y publicado en la revista popular de Deutsche Rundschau en 1878, Haeckel había elaborado las ideas que había esbozado sólo aproximadamente en su tal en Munich. Su artículo, titulado “Zellseelen und Seelenzellen” [“psiques de la célula y las células de la psique”], esbozó una teoría de la evolución de la conciencia que abarca no sólo a las células y los protozoos, sino también a los animales superiores y los seres humanos. Tomando un enfoque comparativo, se dispuso a explorar “la larga escala [Stufenleiter] de los diferentes grados de desarrollo [Entwicklungsgrade] de la psique animal” con el fin de iluminar los “orígenes y límites” de la vida psicológica en el mundo animal. Haeckel de nuevo se acercó a su tema desde el punto de vista del monismo y su ley de desarrollo. El primero le llevó a rechazar las teorías dualistas que aseguraban que la vida psicológica era un fenómeno sobrenatural que no podía explicarse de forma científica.<sup>244</sup> Esta última hipótesis de un principio mecánico impulsado por la selección natural que causó el desarrollo progresivo en tanto las especies (filogenético) y el individuo (niveles ontogenéticos). Esto lo llevó a señalar los límites del programa científico de la introspección en la investigación psicológica que se asoció con Wundt. Respecto a una psicología introspectiva, Haeckel se opuso a que solamente podría pintar un cuadro de un solo lado de la vida psicológica, a saber, el de la plenamente desarrollada ser humano, ya que no pudo acceder a la lenta despliegue de la psique durante la ontogénesis y filogénesis. En lugar de esta empresa antropocéntrica, se prevé una nueva tarea para la *Naturforscher* – “la morfología comparada de los órganos psicológicos y la fisiología comparada de las funciones psicológicas”, llevado a cabo con “el instrumento de investigación más importante” – *Entwicklungsgeschichte*.

El fundamento de esta visión fue de nuevo la condena de Haeckel que, como individuo de primer orden, cada célula tiene una psiquis, o Zellseele. El protoplasma de las células del cuerpo, junto con la sustancia del núcleo, explicó, es el “apoyo material” de toda la vida psicológica. Según Haeckel, esto era quizás el mejor ejemplo de los seres microscópicos: “la gran mayoría de estos protistas permanecer toda su vida en el nivel (*Formstufe*) de una célula única y simple, y sin embargo esta célula posee innegable tanto la sensación y el movimiento voluntario. “Aunque no hay evidencia que sugiere que posean los nervios, los músculos, el cerebro u órganos de los sentidos, protistas, no obstante, muestran la simple” forma sensación “del placer y el dolor” y la simple “forma de movimiento” de la atracción y repulsión.<sup>245</sup> Haeckel creía que estas funciones psicológicas elementales estaban inconscientes. La conciencia, explicó, se debe al “lento y gradual” desarrollo de la filogénesis y ontogénesis, durante el cual un

---

<sup>244</sup> Ernst Haeckel, “Zellseelen und Seelenzellen” (1878), recopilado en *Gemeinverständliche Werke*, ed. Heinrich Schmidt, 6 vols. (Leipzig: Kröner; Berlin: Henschel, 1924), vol. 5, pp. 162-195, en la pág. 163. Haeckel se refería a los puntos de vista de Virchow, que se discutirá en breve, así como las expresadas por Emil Du Bois-Reymond en su famosa conferencia “Ignorabimus”, en el problema de la conciencia: Emil Du Bois-Reymond “Über die Grenzen des Naturerkennens: Ein Vortrag auf der zweiten öffentlichen Sitzung der 45. Versammlung Deutscher Naturforscher und Ärzte zu Leipzig am 14. August 1872” (Leipzig: Viet, 1872). En: Schloegel, J. J., Schmidgen, H. Op. Cit. p. 623.

<sup>245</sup> Haeckel, E. (1878) “Zellseelen und Seelenzelle”, pp 190-194. Haeckel creía que esto era especialmente evidente en los seudópodos de amebas, que se refirió como “cuerdas sensibles” (*Fühlfäden*) y caracterizado como órganos de los sentidos rudimentarios.

incremento de la “división del trabajo” tiene lugar entre las estructuras celulares constitutivas del organismo. Así, en organismos más complejos inferiores como los Turbelarios, encontramos la formación de órganos rudimentarios de sentidos, un sistema nervioso y muscular, los componentes más básicos de un aparato psicológica comparable a la de los seres humanos. Mayores funciones psicológicas como la representación, la conciencia y el pensamiento surgen sólo cuando se desarrollan las estructuras internas del organismo y se especializan mucho más allá, de manera que las estructuras celulares específicas pueden dedicarse exclusivamente a procesos psicológicos. Por medio de estas “células psique” (Seelenzellen) especializadas, tales como los ganglios del cerebro, la organización de los organismos complejos se convierte en “centralizado”: la actividad inconsciente queda desconectada de las psiques celulares. Después se complementa con un centro psicológico consciente, un *Zentralseele*, que conduce a una unidad de la psique y, al mismo tiempo, a la conciencia. En los animales superiores, como los perros y, en última instancia, los seres humanos, el inconsciente es una “república celular”, que gobierna en las plantas, protistas y otros organismos inferiores, se sustituye por una “monarquía celular”, donde las células psique están conectados entre sí para formar un órgano que domina las innumerables células del organismo. Haeckel concluye que cada célula viva tiene una psique celular; pero las células psique sólo se encuentran en los animales superiores: “la psique celular es, pues, un [fenómeno] en general, la psique célula un fenómeno especial de la vida orgánica”.<sup>246</sup>

Las ideas de Haeckel sobre psicología celular fueron eclipsadas en gran medida, sin embargo, por el revuelo ocasionado por la polémica propuesta en su conferencia de 1877 para introducir el monismo de la evolución en las escuelas públicas en el lugar de la enseñanza religiosa. Tomar una posición vehemente contra Haeckel en la reunión de naturalistas y médicos fue Rudolf Virchow, su antiguo mentor. Virchow se opuso ferozmente a la difusión de la doctrina del desarrollo de Haeckel en las escuelas y pidió a los científicos a que se abstengan de ese tipo de divulgación agresiva de las doctrinas científicas a fin de no poner en riesgo la libertad de investigación y la enseñanza que había sido adquirida recientemente en Alemania . Cuando tomó su turno en el podio, Virchow no participó directamente con la proposición de Haeckel para una psicología celular. En vez ridiculizó una teoría que propone que cada célula posee su propia psique, el producto de fuerzas entre los átomos de carbono, nitrógeno, hidrógeno y oxígeno. La reivindicación de tal doctrina puramente especulativa, se burló, requeriría una serie muy prolongada de las investigaciones científicas. Virchow ofrece como una alternativa a su propio punto de vista decididamente antropológico, a consultar si había realmente “una necesidad científica” para extender el dominio de los fenómenos mentales en el mundo de los seres inferiores. Su respuesta fue tajante: “No tenemos motivos para decir ahora que los animales más bajos poseen propiedades psicológicas; encontramos estos sólo en superior y, con certeza, sólo en los animales superiores”.

---

<sup>246</sup> Haeckel, E. (1878) Op. Cit., p. 190.

A pesar de las afirmaciones y advertencias de Virchow, durante los próximos treinta años numerosos estudiosos realizaron el mismo tipo de investigación Haeckel había sugerido. Tal vez el intento más radical para hacer frente a una parte de esta agenda para reducir los fenómenos de la vida psicológica a químicos procesos era la fisiología mecanicista de Jacques Loeb. Loeb no fue nunca un Haeckeliano desde que rechazó la creencia monista de Haeckel en el carácter autónomo de la vida celular y, en general, las reflexiones metafísicas que caracterizaron la teorización del erudito alemán. Más bien, fue Max Verworn cuya *Psychophysiologische Protistenstudien* (Estudios psicofisiológicos de los protistas) – dedicada a su maestro, Haeckel, y ridiculizados por Loeb – para definir el programa de investigación experimental.

### **La psicofisiología de los protistas en Max Verworn**

Max Verworn estudió con Emil Du Bois-Reymond, Rudolf Virchow, Ernst Haeckel, y William Preyer, entre otros, antes de publicar su *Psico-physiologische Protistenstudien* en 1889. Verworn inició su carrera con un estudio de los briozoos de agua dulce, un grupo de invertebrados coloniales que poseen exoesqueletos, por la que obtuvo su Ph.D. en Berlín en el año 1887 bajo la dirección del zoólogo Franz Eilhard Schulze. Incluso en esta temprana fecha, las preocupaciones de Verworn abarcaron la metafísica, así como la fisiológica, y su adhesión a "psico-monismo" – su creencia de que todos los fenómenos de los mundos físicos y psicológicos comparten una misma naturaleza subyacente comenzó a tomar forma firme. En su tesis Verworn argumentó que no son necesarios ni un sistema nervioso ni órganos de los sentidos para la existencia de la vida psicológica. Posteriormente, sostuvo que la ciencia de la psicología podría extenderse más allá del reino de los seres que poseen un sistema nervioso que bien definido que debe tener en cuenta mucho más que los humanos y otros organismos superiores.

Deseoso de reconocer sus deudas intelectuales y documentar su pedigrí académico como un evolucionista, Verworn dedicó su *Protistenstudien* “con sincera gratitud” a su “querido maestro Ernst Haeckel”. En el prefacio dedicatoria a su mentor, él escribió: “Cuando me acerqué mi formación zoológica bajo su dirección en el Instituto Zoológico en Jena, fue, desde el principio, la vida de los organismos inferiores que despertó mi interés en el mayor grado. Porque aquí, en el nivel más bajo de la vida en general, en el marco de una sola célula, todos los fenómenos de la vida que observamos en los más altos organismos ya se puede encontrar en su forma más simple”. Al igual que Haeckel, Verworn hizo hincapié en que para comprender todos los fenómenos de la vida, incluyendo los fenómenos psicológicos era necesario “volver a los organismos elementales”. En concreto, explicó, fue idea de Haeckel de un “psique celular” que inspirado su propio interés en los procesos psicológicos de los animales, sobre todo su enfoque en la “vida psicológica de los organismos inferiores”. Elaboró en la introducción, unas páginas más adelante, que “es imposible llegar a alguna idea en esta dirección, siempre que los únicos objetos de investigación son los procesos psicológicos complicados en los seres humanos y los animales superiores”. Al igual que en la morfología zoológica hay que recurrir a los animales inferiores de encontrar “las formas más originales y sencillas (...) la misma observación tiene, por supuesto, para ciertos

fenómenos psicológicos, y por lo tanto la investigación sobre la vida psicológica de los animales inferiores de hecho debe difundir la luz sobre la psicología de los animales superiores y de los seres humanos”.<sup>247</sup>

Verworn inició sus investigaciones con lo que llamó "observaciones puras" de los movimientos espontáneos y las actividades de la vida de los organismos, que estaban destinados a proporcionar una base para los dos métodos experimentales que fueron el enfoque del libro: las investigaciones de la conducta en los protozoos bajo condiciones variables inducidas sistemáticamente de forma artificial tales como la luz, el calor y la electricidad; y experimentos de vivisección que requerían mucha paciencia y habilidad, procediendo a localizar las funciones fisiológicas y psicológicas de los protistas.

Aunque inspirado en general por las ideas de Haeckel, las investigaciones de Verworn se modelaron más concretamente en los estudios psicológicos de William Thierry Preyer del desarrollo de los movimientos en los niños.<sup>248</sup> La justificación de este enfoque, explicó, fue que los movimientos de los protozoos constituían las “únicas expresiones objetivas de los procesos subjetivos” de la vida mental de los seres no humanos; en otras palabras, en ausencia del estudio de los movimientos, no habría motivos en absoluto para la atribución de los procesos psíquicos para protozoos. En sus investigaciones psicológicas Verworn distingue entre los movimientos espontáneos, aquellos movimientos que se producen independientemente de la intervención experimental, y lo que él denomina “movimientos de estimulación” (*Reizbewegungen*), es decir, movimientos que siguen inmediatamente a la aparición de estímulos experimentales, como el calor, la electricidad, o magnetismo. A lo largo de gran parte del texto contó los diversos métodos por los cuales se produce movimientos de estimulación; por ejemplo, hizo que los organismos que se disponen como “limaduras de hierro (...) distribuidos en una hoja de papel sobre un imán de herradura” cuando él colocó dos electrodos puntiagudos en los lados opuestos de una gota de agua que contiene paramecios. Verworn representó típicamente estos movimientos en grandes grupos de organismos, centrándose en el estado final en el que sus acciones dieron como resultado colectivamente en una orientación común (véase la Figura 2). Movimientos de estimulación, explicó, eran puros “movimientos reflejos” – un término que tomó prestado de Preyer – ya que, en general, los protozoos “responden a cada estímulo siempre de la misma manera, con una máquina como legalidad y sin la más mínima desviación”. Llegó a la conclusión de que a pesar de que los comportamientos

---

<sup>247</sup> Verworn, M. (1889) *Psycho-physiologische Protisten-Studien, Experimentelle Untersuchungen*. Verlag von Gustav Fischer, Jena. (cit. n. 7), pp. v, vi, 3.

<sup>248</sup> Verworn, M. (1889) Op. Cit. pp. 19, 117, 137, 136-140. En su obra “Die Seele des Kindes” William Thierry Preyer se basó en observaciones diarias de su hijo que él emprendió durante varios años. El libro está dividido en tres partes dedicadas al desarrollo de los sentidos, la voluntad y el intelecto. Según Preyer, los movimientos son expresiones directas de la voluntad. Movimientos impulsivos son la etapa más temprana en el desarrollo de la voluntad. Ellos son seguidos por las apariciones de movimientos reflexivos, instintivos e imitativos. Durante el curso del desarrollo, los movimientos se vuelven cada vez más conectado a las representaciones, y “movimientos deliberados” (*überlegte*) se hacen posibles. Estos indican la existencia de una “voluntad pura” en el niño, que es la base de su comportamiento intencional. Ver Preyer, Seele des Kindes (cit. N. 30), pp. 119-218. En: Schloegel, J. J., Schmidgen, H. Op. Cit. p. 628.

heliotrópicos, termotrópicos y galvanotrópicos a menudo dan la apariencia de una acción de adaptación o un propósito, no guardan relación con los procesos psicológicos superiores. No son actos conscientes o voluntarios.

Además, Verworn sostuvo que los movimientos espontáneos de los protozoos no podían considerarse como expresiones de la voluntad o de la conciencia. Sostuvo que este tipo de acciones son o muy limitados y repetitivos – por ejemplo, la pulsación de vacuolas en los cuerpos de los protozoos – y por lo tanto deben ser vistos como “automáticos”; o son al azar – como en los repentinos latigazos de los cilios periestomal en muchos ciliados – y deben ser considerados “impulsivos” – otro término prestado de análisis de Preyer de movimiento en los niños. Incluso las actividades espontáneas más complicadas relacionados con la nutrición, la conjugación, y la construcción de una capa protectora, como en el ameboide *Diffugia*, concluyó, no eran movimientos intencionales o conscientes. Estos “procesos voluntarios inconscientes” (*Willensvorgänge unbewusste*) no implican otra cosa que el funcionamiento de combinaciones de estímulos impulsivos, y movimientos automáticos.

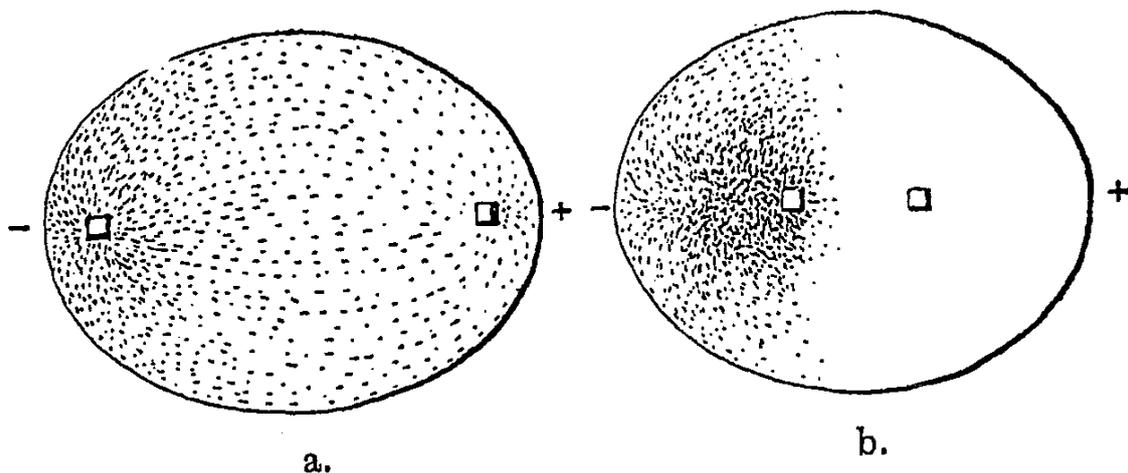


Fig. 20. Reacción del paramecio a la corriente eléctrica, referido como “galvanotropismo”. Max Verworn (1889) *Psycho-physiologische Protistenstudien: Experimentelle Untersuchungen*. Gustav Fischer, Jena. p. 118.

Verworn encontró estas interpretaciones a ser apoyados por sus investigaciones de las funciones sensoriales en los protozoos, que resultó ser organizado mínimamente. Sostuvo que las reacciones a la luz se produjeron igualmente en aquellos protozoos que no poseen las manchas de pigmentación descritos por algunos naturalistas como “ojos” u “órganos de los sentidos”, como en los que lo hacen. También encontró que, con la excepción de los flagelos y los cilios, que son altamente sensibles a los mecánicos estímulos cada parte del protoplasma es igualmente sensible a los mecánicos, químicos y estímulos electromagnéticos y el calor y que exhiben protozoos sin diferenciación de órganos específicos sensato estos estímulos. Incluso en el caso de “los protistas más desarrollados”, los ciliados, Verworn encontró que no hay “elementos sensibles” para la sensación de la luz; y en aquellos grupos de protozoos menos desarrollados que hacen poseer tales elementos razonables, se desarrollaron solamente lo suficiente para

distinguir entre el brillo y la oscuridad. En cualquier caso, y sin un órgano sensorial diferenciado para percepción de la luz, una “representación del yo” es muy imperfecta si no imposible en protozoos, y fuera de esta “imperfección de una representación del yo [lo] sigue (...) con la necesidad de que los procesos psíquicos conscientes (...) no pueden existir”.<sup>249</sup>

En este punto, podría parecer que el estudio de Verworn de un psicofisiología explícita de protozoos estaba en peligro de colapso. Desde la perspectiva de una psicología centrada en la voluntad, la conciencia y el ego, que de hecho habría sido difícil de entender cómo sus estudios de protozoos contribuyeron a la psicología, ya que siempre hay evidencia de o penetraciones en ninguno de estos procesos psicológicos “superiores”. Sin embargo, la conclusión del Verworn apuntó en la dirección exactamente opuesta: concluyó en su lugar de que cada parte del cuerpo del protozoo poseía propiedades psicológicas. La evidencia de esta interpretación surgió en la parte final de su estudio, donde se empleó técnicas de microvivisección para producir segmentos corporales desnucleados, cuyos movimientos y estímulos espontáneos Verworn demostró que el núcleo protozoario no era el centro de la función psicológica, tal como algunos investigadores habían sospechado. Además, en cada una de las especies Verworn encontró que las piezas protoplasmáticas desnucleadas que creó con su diminuto bisturí tenían las mismas respuestas a diversos estímulos experimentales que sus homólogos no lesionados. Un último experimento que demuestra que las acciones coordinadas de barrido de los cilios periestomal se rompieron en el punto de una incisión llevó a Verworn reintroducir las metáforas de la sociedad civil empleadas por su profesor Rudolf Virchow treinta años antes. Mientras Virchow se había basado en las relaciones entre los ciudadanos libres en un Estado liberal para describir las relaciones entre las células en el organismo, Verworn empleó la noción de caracterizar las relaciones entre cada pequeña “parte protoplásmica” dentro del cuerpo de un animal unicelular microscópico: “Uno puede comparar todo el cuerpo protista a una gran reunión de personas, donde cada persona corresponde a una pequeña parte de protoplasma. Las decisiones de la reunión son los movimientos totales de todo el cuerpo. (...) Pero así como en la recolección de cada persona es un individuo autónomo, con su propia opinión, cada pequeña parte de protoplasma posee su autonomía”. Convencido por estos resultados experimentales que dio a conocer una “constitución republicana” (*republikanische Verfassung*) de las piezas elementales del protozoo, Verworn en última instancia concluyó que los protozoos poseían sensaciones elementales y representaciones – aunque inconscientes – además de los procesos inconscientes de movimientos reflexivos, automáticos, e impulsivos que había observado con anterioridad. Como él lo resumió, había encontrado que, en efecto, “cada parte elemental de protoplasma tiene su propia psique autónoma”. En otras palabras, Verworn encuentra la individualidad no en el nivel del protozoo en su conjunto, sino en sus partes protoplásmicas.<sup>250</sup>

---

<sup>249</sup> Verworn, M. (1889) Op. Cit. pp. 125–130, 144–146.

<sup>250</sup> Verworn, M. (1889) Op. Cit. pp. 187–192.

Sin embargo, la conexión entre estas propiedades psíquicas muy rudimentarias y los actos conscientes de organismos superiores se mantuvo precariamente inexplicable. Al abordar este problema en las páginas finales de su texto, Verworn adoptó con entusiasmo los principios de la polémica conferencia de Haeckel en 1877, así mismo la transformación de sus propios estudios psicofisiológicos de los protistas en una evolución simultánea y una “psicología molecular” basada químicamente. Por lo tanto, él sostuvo que “la causa del movimiento del cuerpo protista radica en los procesos moleculares de sus partes elementales, y fuera de ellas se ha desarrollado la psique de los animales superiores y los seres humanos”. Según Verworn, los movimientos en los protozoos fueron causados por procesos moleculares dentro y entre las partes protoplásmicas, lo que representó las funciones elementales de un sistema nervioso. Estos mismos procesos moleculares, sin embargo, fueron la fuente de los procesos del sistema nervioso de los metazoos y, finalmente, de los humanos en la evolución; en consecuencia, los procesos psicológicos de los seres inferiores y más superiores se unieron en las mismas bases químicas. Así, mientras que los movimientos y la sensibilidad de los microorganismos protoplásmáticos eran fenómenos psicológicos fundamentales en su propio derecho, también eran los precursores evolutivos de los procesos psicológicos superiores observadas en los organismos superiores. Es desde esta perspectiva de una psicofisiología químicamente y evolutivamente de base que Verworn, al igual que su mentor Ernst Haeckel, se volvió hacia el humilde protozoo para demostrar la unidad de toda la psicológica, y de hecho todos fenómenos naturales.<sup>251</sup>

### **Alfred Binet y la “vida psíquica” de los microorganismos**

Verworn no fue ni el primero ni el único estudioso serio dedicado a estudiar la psicofisiología de los protozoos; dos años antes, en 1887, Alfred Binet había publicado un estudio sobre la “Psicología de proto-organismos”. Sus resultados aparecieron en dos partes en la *Revue Philosophique* de Théodule Ribot, la revista francesa líder para la psicología en ese momento. En “La vie des psychique micro-organismes”, Binet presentó los microorganismos como objetos importantes para investigación psicológica. En primer lugar, explicó que muchos “datos interesantes” sobre la “vida psíquica” de los microorganismos han sido recogidos por los eruditos en los últimos años, pero que había sido insuficientemente comprendido y discutido como fenómenos psicológicos. Dado que los datos se dispersaron en monografías y revistas de todo tipo, “donde el psicólogo no piensa en su búsqueda”, tenía la intención de familiarizar a los lectores de la Revista “con una parte de estos tesoros” y, como consecuencia, para hacer todo un campo de nuevos temas accesibles a la investigación psicológica. El artículo de Binet fue revisado en dos partes y publicado como parte de un libro, *Études de psychologie expérimentale*, en 1888 y traducido al inglés en 1889 y al alemán en 1892.

El argumento principal de "La vie des psychique micro-organismes" era que los microorganismos unicelulares de hecho tienen una vida psicológica. Esta convicción se

---

<sup>251</sup> Verworn, M. (1889) *Op. Cit.*, pp. 202, 200–207, 212–213.

basa en al menos dos supuestos. El primero deriva tanto desde la perspectiva evolutiva de Binet y su exposición a la fisiología general en Balbiani<sup>252</sup>. Binet argumentó que había una serie de desarrollo continuo que va desde los seres humanos hasta las formas más elementales de la vida. Como consecuencia, las propiedades psicológicas y procesos que se conocían desde el estudio de los seres humanos también se podrían esperar en los seres vivos más, aunque de forma elemental. Hizo esta suposición explícita en el prólogo, escrita especialmente para la edición americana de su libro.

Binet argumentó: "Si se niega la existencia de los fenómenos psicológicos en organismos inferiores, será necesario asumir que estos fenómenos pueden sobreañadido en el curso de la evolución, a medida que un organismo crece más perfecto y complejo. Nada podría ser más inconsistente con las enseñanzas de la fisiología en general, lo que nos muestra que todos los fenómenos vitales están presentes previamente en células no diferenciadas". Binet reforzó su argumento señalando que muchos otros investigadores que estudiaron protozoos apoyaron su opinión, entre ellos su mentora Balbiani, el naturalista Karl Möbius, y Max Verworn. De este modo dio a entender su adhesión al monismo, pero él no hizo tal puntos de vista centrode sus argumentos.<sup>253</sup>

Además, Binet argumentó que era insuficiente para atribuir las acciones y capacidades de los protozoos a la simple irritabilidad celular. Advirtió que "incluso en los niveles más bajos de la escala de la vida, las manifestaciones psíquicas son mucho más complejas de lo que generalmente se cree". Entre los seres vivos más simples, explicó, "nos encontramos con manifestaciones de una inteligencia que trasciende en gran medida los fenómenos de irritabilidad celular". Por lo tanto Binet centró su estudio no, como lo hizo Verworn, en los dos elementos que ampliamente acordados para constituir la "vida de relación" de una célula que es irritable - esto es su sensibilidad y las reacciones al entorno - sino más bien en fenómenos más complejos. Él proporcionó una visión general de los grupos más importantes de los protozoos, y luego pasó a hablar de sus órganos motores, el "sistema nervioso difuso", que figura en su protoplasma, y los

---

<sup>252</sup> Édouard-Gérard Balbiani. Sobre Balbiani véase L. F. Henneguy, "E. G. Balbiani (1823-1899)", *Archives d'Anatomie microscopique*, 1900, 3: 1-31. Ver también Bernard, *Rapport sur les progrès et la marche de la physiologie générale* (cit. N. 5), pp. 102-103, que detalla las opiniones positivas de Bernard de la beca de Balbiani y su contribución al desarrollo de la fisiología general hacia 1867. Binet mantuvo estrechos lazos con Balbiani, que era su suegro, así como su mentor. Un año después de Binet publicó su artículo sobre la vida psíquica de los microorganismos, la *Revue Philosophique* también publicó su informe de las conferencias de Balbiani sobre la generación y la herencia en el Collège de Francia; ver E.-G. Balbiani, "Les théories modernes de la génération et de l'hérédité," *Rev. Phil. Fr. Étrang.*, 1888, 25: 529-559. En: Schloegel, J. J., Schmidgen, H. Op. Cit. p. 631.

<sup>253</sup> Binet, *Psychic Life of Micro-organisms*, traducido por McCormack (cit. N 38), pp iv-v, v. Aunque Binet estaba familiarizado con los estudios zoológicos de Haeckel y sus ideas para una psicología celular, no está claro hasta qué punto compartía sus creencias monistas. Incluso los estudios más filosóficos de Binet publicados después del cambio de siglo no son muy instructivos. Él se describe a sí mismo como un "monista" en su artículo "Esprit et matière", pero esto parece referirse más a un monismo experiencial del tipo propuesto por Ernst Mach que a una visión del mundo Haeckeliana. Ver Alfred Binet, "*Esprit et matière*", *Boletín de la Société Française de Philosophie*, 1905, 5: 73 a 101, esp. p. 86; Binet, "*Cerveau et pensée*" *Archives de Psychologie*, 1907, 6: 1-26; y Binet, *L'Ame et le corps* (París: Flammarion, 1905). En: Schloegel, J. J., Schmidgen, H. Op. Cit. p. 631.

"ojos" o "manchas oculares" que pensaba que constituían los órganos de los sentidos de muchos especies.<sup>254</sup>

Binet examinó con más detalle las actividades psicológicas asociadas con la nutrición y la fecundación, antes de concluir con una discusión sobre el papel fisiológico que desempeña el núcleo en las funciones psicológicas de los organismos.

Con respecto a la alimentación, Binet estaba interesado principalmente en lo que se refiere como "la alimentación animal", la introducción de los alimentos en una boca cualquiera, sea temporal o permanente. Afirmó que los movimientos que constituyen la búsqueda de los microorganismos de los alimentos son "no simples movimientos", ya que, entre otras cosas, el protozoo debe "guiarse a sí mismo" para evitar obstáculos o mover a un lado, dirigir sus órganos prensiles hacia los objetos que encuentra, y distinguir alimentos a partir de materiales sin valor. En algunas especies del protozoo selecciona sólo ciertos tipos de alimentos, lo que significa que ejerce elección. Binet concluyó a partir de la observación de estas acciones que "los movimientos en los infusorios gratuitas muestran todas las características de los movimientos voluntarios". Encontró este "voluntarismo" ser especialmente evidente en el proceso de captura de presas vivas. Aunque reconoció la inconveniencia de lenguaje antropomórfico en tales estudios, sin embargo, lo utilizó libremente en todo el texto. Por lo tanto, para demostrar su punto, se refirió a una "caza" en el que "ataca" y los órganos de "defensa" se utilizan, por ejemplo, cuando los Didinium "disparan" sus tricocistos<sup>255</sup> en forma de varilla a su "víctima". En otros casos, se encontró que los microorganismos se unen en "tropas" para atacar a otros animales, a menudo mucho más grandes que ellos mismos, lo que sugiere que tienen una organización social rudimentaria.<sup>256</sup>

Aunque Binet acordó que las condiciones morfológicas y fisicoquímicas fueron determinantes importantes de este tipo de actividades, que estaba convencido de que algún tipo de inteligencia que no podía ser reducido a los fenómenos de irritabilidad también entró en juego. Los movimientos dirigidos hacia una meta de protozoos presuponen una conexión organizada entre ciertos estímulos y ciertos movimientos en

---

<sup>254</sup> Binet, *Psychic Life of Micro-organisms*, Op. Cit, p. 3; and Binet, "*Vie psychique des microorganismes*"(cit. n. 7), pp. 450–470.

<sup>255</sup> Un tricocisto es un orgánulo se encuentra en ciertos ciliados y dinoflagelados. Un tricocisto se puede encontrar en el tetrahimena y a lo largo de las vías de los cilios de varios sistemas metabólicos. También es una estructura en la corteza de ciertos protozoos ciliados y flagelados que consta de una cavidad de largos y finos hilos que pueden ser expulsados en respuesta a ciertos estímulos. Los tricocistos pueden ser ampliamente distribuidas en un organismo o restringidas a ciertas áreas (por ejemplo, tentáculos, papilas, alrededor de la boca). Hay varios tipos. tricocistos mucoides son inclusiones alargadas que pueden ser expulsados como cuerpos visibles después de la estimulación artificial. Tricocistos filamentosos en Paramecio y otros ciliados se descargan como filamentos compuestos por un eje transversal estriado y una punta. Toxicistos (en Dileptus y ciertos otros protozoos carnívoros) tienden a ser localizados alrededor de la boca. Cuando se descarga, un toxicisto expulsa un largo filamento, no estriado con una punta en forma de varilla, que paraliza o mata a otros microorganismos; este filamento se utiliza para capturar el alimento y, presumiblemente, en la defensa. La importancia funcional de otros tricocistos es incierta, aunque las del Paramecio aparentemente se puede extruir para el anclaje durante la alimentación. Fuente: Wikipedia@.

<sup>256</sup> Binet, "*Vie psychique des micro-organisms*" , pp. 479–480, 489; para otros ejemplos de lenguaje antropomórfico, ver p. 583.

su protoplasma. Llegó a la conclusión de que esta conexión era de naturaleza psicológica, ya que “para explicar la naturaleza física de este contexto parece ser totalmente imposible” (Binet 1880: 585).

Los argumentos de Binet sobre el proceso de fecundación en microorganismos fueron igualmente antirreduccionista. Aquí, se basó en gran medida en las afirmaciones de Balbiani y observaciones relacionadas que ciliados se reproducen sexualmente en el apareamiento, seguido de fertilización interna. De esto y de material relacionado, concluyó que la conjugación de protozoos no era puramente mecánica, pero era, más bien, un fenómeno psicológico. Sostuvo que el frenesí de las interacciones entre los protozoos anteriores relaciones sexuales mostró claramente que se movían de manera voluntaria y conscientemente. El acoplamiento en sí era de especial interés, ya que “el psicólogo puede admirar la precisión con la que los dos individuos toman la actitud necesaria para la fecundación” (Binet 1880: 587).

### **Herbert Spencer Jennings y su método de ensayo-error en los organismos inferiores**

En el otoño de 1896, unos diez años después que Verworn i Binet iniciaran sus estudios sobre protozoos, el zoólogo estadounidense Herbert Spencer Jennings lanzó sus propias investigaciones sobre el comportamiento de los organismos unicelulares en el laboratorio de Verworn en Jena. Jennings tomó estos estudios durante un año de estudios de posdoctorado financiado por una beca de viaje expedido por la Universidad de Harvard, donde acababa de terminar su doctorado bajo el citólogo Edward L. Marcos. Su tesis fue un estudio de células de linaje clásico del rotífero *Asplanchna* que trazó el desarrollo temprano de la fertilización de estos metazoos microscópicos a través de la gastrulación. Como era característico de este género de la investigación embriológica, la investigación de Jennings estaba preocupada con los procesos que determinan la división celular y el desarrollo de la primera y la microscopía avanzada requerida y habilidades de observación.

Durante sus estudios Jennings formuló una perspectiva sobre los fenómenos biológicos que se centraron *en la respuesta normativa interna del organismo o célula a los estímulos externos y no en los “efectos” inanimados de esos mismos estímulos*. Las investigaciones del embriólogo Wilhelm Roux contribuyeron significativamente a la formación de puntos de vista de Jennings, que iba a retener a lo largo de su carrera, quien también ensayaba en Jena. Aunque Roux es más conocido por su insistencia en el uso de la experimentación para analizar los procesos biológicos como fenómenos mecánicos, reducido a los términos más simples posibles, empleó estos métodos, que se refirió como *Entwicklungsmechanik* (“la mecánica de desarrollo”), para hacer frente a las preguntas sobre la adaptación funcional de los factores internos de desarrollo de las células. A pesar de que no adoptó inmediatamente el componente experimental del programa de *Entwicklungsmechanik* de Roux, Jennings abrazó a su enfoque funcional en sus propios estudios de desarrollo temprano.

También proporcionó recursos importantes para la concepción de *adaptación funcional* de Jennings fue las investigaciones de otro joven embriólogo entrenado Jena, Curt Herbst. En 1894 y 1895 Herbst aplicó las ideas de la fisiología de estímulo a la morfogénesis de los animales para argumentar que “así como el movimiento libre de los organismos [tales como las plantas y los protozoos] son influenciados en la dirección de su movimiento por agentes externos, también los tejidos independientes responden a ciertos estímulos direccionales”. En su Ph.D. tesis Jennings aprovechó la analogía de Herbst entre los organismos inferiores y las células en un organismo en desarrollo para argumentar que la dirección de la división celular en el desarrollo temprano como el resultado de la reacción de la célula en división frente a un estímulo de forma determinante.

Debido a sus investigaciones del doctorado fueron en gran parte descriptivas, Jennings amplió sus estudios postdoctorales en una investigación experimental que ofrecería respuesta a cómo las células embriológicas responden a los estímulos durante la fase de desarrollo. En el laboratorio de fisiología general del profesor Max Verworn, Jennings planeaba investigar el comportamiento de las células en vida libre - es decir, protozoos - como un modelo que podría arrojar luz sobre las acciones de los grupos de células embriológicas.

Jennings abandonó su meta original, sin embargo, cuando él se enfrascó con las respuestas de comportamiento de los organismos unicelulares como los fenómenos científicos por derecho propio. Una vez en Jena, esbozó un programa de investigación experimental que tuvo como objetivo construir una imagen completa de las actividades típicas de un organismo unicelular individual. Estos incluyen sus reacciones y la interacción de las reacciones de acuerdo con las circunstancias ordinarias de los múltiples estímulos que interactúan y el cambio de las respuestas a las fluctuaciones de las condiciones ambientales y de los estados fisiológicos.

Su actitud de rechazo hacia Haeckel probablemente se debió a la negligencia del zoólogo alemán de la adaptación como una causa de la evolución. Concepto que sirvió como fundamento de la propia preocupación temprana de Jennings por la capacidad de adaptación de los organismos.

Los estudios de investigación posdoctorales de Jennings dieron lugar a una serie de diez artículos entre 1897 y 1902, ocho de los cuales se publicó en el Diario de Fisiología y la revista *American Journal of Physiology*. Jennings presentó su trabajo como una contribución a la fisiología general y la psicología comparada, sin embargo, su elección de lugares de publicación sugirió la importancia para él de la construcción de sus investigaciones sobre una base fisiológica. Estos artículos constituyen una elaborada serie de investigaciones sobre las respuestas de los protozoos individuales a una amplia gama de variables fisiológicas y químicas - por ejemplo, la sensibilidad variable de los paramecios a los productos químicos, en relación con la naturaleza de su propio fluido de cultivo y la relativa fortaleza o debilidad de las soluciones ácidas y alcalinas empleadas. Además, Jennings puso una considerable atención a la investigación sobre la

base anatómica de los fenómenos fisiológicos, tales como en los diversos comportamientos de los cilios orales y del aparato locomotor en los mismos y diferentes estímulos, y de la sensibilidad diferencial de las diferentes partes del organismo.

A medida que la investigación continuó, utilizó los resultados detallados de sus primeros estudios del Paramecio como punto de referencia para numerosos estudios comparativos con otros protozoos.

En 1899 Jennings ofreció sus conclusiones iniciales *sobre la relativa simplicidad o complejidad de las capacidades psicológicas de los protozoos*. Su respuesta fue motivada en parte por su lectura de la traducción de Binet en 1889 de vida psíquica de microorganismos y también por su creciente conocimiento de las investigaciones como las que por el erudito francés Félix Le Dantec, que, como Loeb, considera las acciones de protozoos como nada más que reacciones fisicoquímicas. Su propia posición, que cayó entre estas dos interpretaciones, comenzó a cristalizar en el segundo artículo de la serie. En una secuencia de experimentos demostró que la reacción del motor en un Paramecio - que consta siempre de un movimiento hacia atrás seguido de un giro y un movimiento hacia adelante posterior (véase la Figura 21) - no fue causada por una localización de los estímulos, como se encuentra en los animales superiores: a su vez los paramecios ni hacían estímulos beneficiosos ni tampoco estímulos nocivos. Más bien, la experimentación repetida demostró que la reacción del motor, más tarde renombrado la "reacción evitable," era un mecanismo interno para el organismo, ya que no podía ser variada por cualquier estímulo externo. La aparente complejidad del mecanismo le sugirió que el interés principal de estas investigaciones era más psicológico que fisiológico. La naturaleza fija de la reacción del motor, sin embargo, que comparó con las reacciones de un músculo aislado de una rana, indicó que el comportamiento reactivo del organismo fue causado por ni conocimiento ni elección. Por lo tanto Jennings llegó a la conclusión de que a pesar de que el Paramecio era un ser psicológico, era una extremadamente simple.<sup>257</sup> Durante los próximos años Jennings modificaría sus interpretaciones significativamente destacando que *los organismos unicelulares reaccionan a los estímulos como individuos*. La transformación en sus opiniones se produjo mientras se dedica a nuevos y extensos estudios experimentales y adoptó los principios de la psicología evolutiva defendidas por C. Lloyd Morgan, William James, James Mark Baldwin, y otros como su estructura interpretativa. Jennings propuso por primera vez su nueva interpretación de una colección de ensayos publicado en 1904. En el documento final de este grupo argumentó que, cuando se considera en relación con las condiciones ambientales, la reacción evitando en organismos inferiores correspondía con el método de "prueba y error" vistos por Morgan como central para el desarrollo de la inteligencia en los animales superiores. Según Morgan y otros, explicó, los animales emplean el método de ensayo y error hasta que se suceden en un medio eficaz de actuar en un caso específico. Cuando se presentan con la misma situación en un momento posterior, el animal utiliza ese método sin

---

<sup>257</sup> Jennings, H. S. (1899) "Studies on Reactions to Stimuli in Unicellular Organisms, III" pp. 388-389; and Jennings, H. S. (1898) "Studies on Reactions to Stimuli in Unicellular Organisms, II" pp. 338-339.

ensayos adicionales. Jennings insistió, sin embargo, que este tipo de acciones no se limitaron a los gatos, perros y otros organismos superiores: “Comportamiento que tiene las características esenciales del método de “prueba y error” está muy extendida entre los organismos inferiores y más bajos, a pesar de que no pasa en ellos de modo inmediato a la acción inteligente”. Él volvió a analizar varias acciones de Paramecio en términos del método de ensayo y error para demostrar su capacidad para explicar el comportamiento, así como para ilustrar la posibilidad de que los mecanismos de “ensayo” y “error”. Los eventos tienen sus raíces en los " estados fisiológicos "común en todo el espectro evolutivo.

Jennings se explayó sobre su nueva interpretación evolutiva en su comportamiento libro *Behavior of the Lower Organisms*, publicado en 1906. En este texto reunió a los resultados de sus estudios anteriores y los realizados por otros en una discusión más amplia dedicada en gran parte a cuestiones psicológicas. En contraste con *Protistenstudien* de Verworn, el libro de Jennings proporciona al lector experimentos ilustrados centrados en los individuos y no sólo en grupos de microorganismos. Por lo general, estas representaciones fueron históricas: representan una serie de eventos, desarrollados en el tiempo, en el que el organismo individual exhibe un cierto ejemplo de comportamiento para la adaptación, el movimiento de un paramecio a posiciones sucesivas, ya que continuó haciendo pruebas de su entorno. Tampoco Jennings incorporar técnica de la vivisección de Verworn en su práctica experimental. Por el contrario, su trabajo tenía el objetivo de documentar el comportamiento individual de todo el organismo.

Aunque el tratamiento de Jennings de la conducta fue una fuente de inspiración para el movimiento conductista que surgió en la psicología americana unos años más tarde, su concepción del comportamiento difiere significativamente de muchas de las opiniones que llegaron a caracterizar el conductismo. Mientras sostiene firmemente a una posición objetivista, tanto en su lenguaje y su práctica experimental, sostuvo que la necesidad de discutir el comportamiento de los organismos inferiores en términos objetivos solo tenía “una posible desventaja”: el resultado fue la desafortunada aparición de “un abismo absoluto entre el comportamiento de los organismos inferiores, por una parte, y la del hombre y los animales superiores en el otro. A partir de un análisis del comportamiento del organismo inferior en términos objetivos, en comparación con una discusión sobre el comportamiento del hombre en términos subjetivos”, continuó, “tenemos la impresión de la discontinuidad total entre los dos”. Con el fin de determinar si tales una brecha era real o un artefacto de la utilización de un lenguaje objetivo, comparó las características de comportamiento de los dos grupos. Sobre la base de las características objetivas que se correspondían con categorías tales como la percepción, la elección y la atención, concluyó que los protozoos de hecho exhiben estos comportamientos y que no había una continuidad clara en el carácter normativo de la conducta “de los organismos más bajos hasta el hombre”.

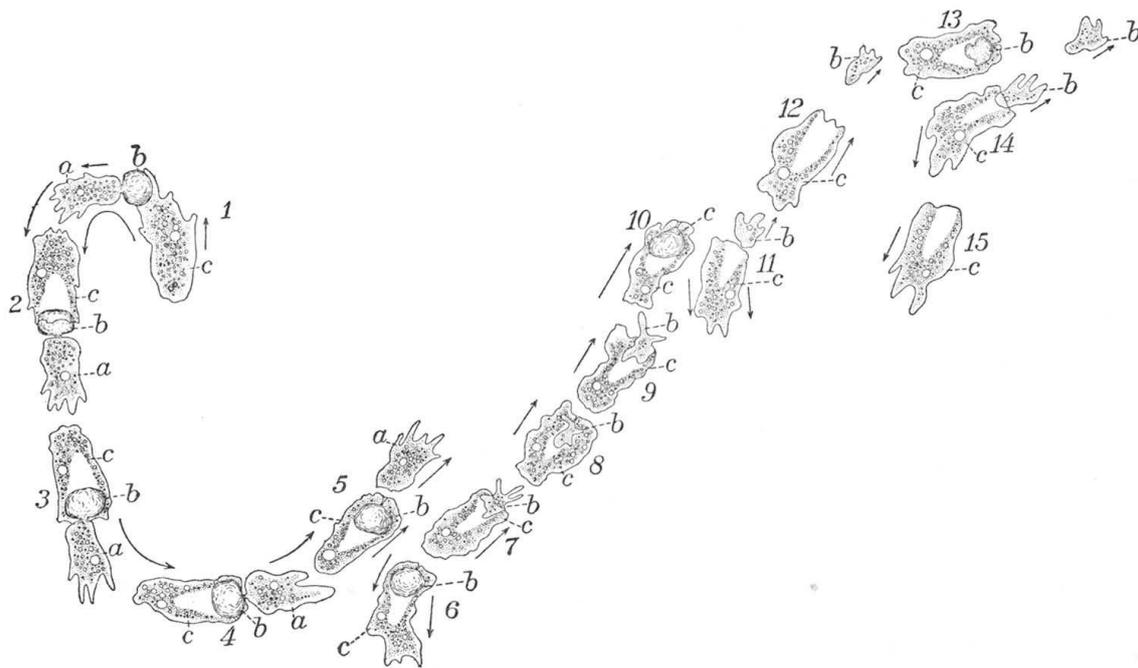


Figura 21. Representación en el tiempo de la búsqueda de una ameba por otra para la comida. De Herbert Spencer Jennings (1906) *Behavior of the Lower Organisms*. Columbia University Press, New York, p. 16.

Jennings se aventuró un paso más allá a la pregunta de si la conciencia acompañada estos fenómenos objetivos. Si bien reconoce que no había forma alguna de demostrar objetivamente la existencia o no de conciencia en organismos inferiores, se dispuso a explorar una pregunta relacionada que pueda ser respondida: ¿Tienen los comportamientos de los organismos inferiores de lo que podríamos esperar que fuese un cierto tipo de conciencia limitada? La respuesta para Jennings fue que sí; a través de nuestra propia conciencia, insistió, era posible apreciar la posible naturaleza de las acciones de otros organismos. En el caso de Paramecio, por ejemplo, la reacción de evitar “ofrece una impresión tal que uno reconoce involuntariamente como un pequeño objeto que actúa de manera análoga a la nuestra”. Hablando desde la experiencia personal, añadió: “en la realización de investigaciones objetivas que nosotros mismos nos entrenamos para suprimir esta impresión, sin embargo la exhaustiva investigación tiende a restaurarse más fuerte que al principio”. Al hacer este argumento, Jennings trató de superar lo que él creía que eran las deficiencias tanto del movimiento conductista naciente y sus propias investigaciones anteriores. Aprovechando los conocimientos desde el punto de vista del desarrollo evolutivo y con lo que el observó de nuevo en el estudio del comportamiento, cerró la brecha entre observador y observado, y por lo tanto superó los estándares de objetividad de la investigación del comportamiento.

### El propósito de Jakob von Uexküll

Para Uexküll, el problema reside en que un mundo circundante de un sujeto determinado solo puede percibirlo el propio sujeto, o sujetos de una misma especie (con

sus desviaciones particulares) puesto que “*No podemos conocer esos esquemas ajenos sino dentro de nuestros propios esquemas*”.

Los fenómenos, sean internos como externos, sólo pueden ser reconocidos por el sujeto en sí mismo. Por lo tanto el *Innenwelt* – o que es lo mismo, “la percepción significativa del entorno a través del mundo interno” – de cada organismo viviente es inaccesible para los demás organismos tal como lo vive el sujeto. Tan sólo podemos acceder al mundo aparecido por el sujeto (*Erscheinungswelt*) gracias a su mundo sensible (*Merkwelt*) por sus órganos sensitivos (*Merkorgan*) gracias a las sensaciones (*Merkmale*) que ofrecen las señales perceptibles o signos sensibles (*Merkzeichen*) y que, de hecho son las que nos ligan a la realidad física (*Wirklichkeit*).

Sería en 1899 que Uexküll publicó, junto con Theodor Beer y Albrecht Bethe un excelente artículo titulado “*Proposiciones para una objetivación de la nomenclatura en la fisiología del sistema nervioso*”.<sup>258</sup> La idea culminante de la discusión de Beer, Bethe, y Uexküll fue la de reemplazar terminologías evaluativamente antropomorfas, psicologistas e instropeccionistas esbozando una nueva nomenclatura orientada más objetivamente, tratando de redefinir todo el discurso a través de la adopción de nuevos conceptos normalizados. De esta forma, establecieron un marco objetivo para los procesos fisiológicos de los órganos receptores y los órganos efectores que funcionan en los procesos de percepción y de sensibilidad que más tarde sería introducido en el behaviorismo americano.

Uexküll realiza una diferenciación entre un estímulo, un proceso fisiológico y la sensación. Pone como ejemplo de estímulo a la vibración de las ondas fotónicas, como proceso fisiológico la recepción de los fotones a través de los órganos fotorreceptores, y como sensación la percepción de la luz.

Los procesos de registro de estímulos, su transmisión exportándose a los órganos efectores y la conmutación y distribución de los mismos por los canales de excitación (centros, ganglios, etc.) vienen descritos bajo estas nomenclaturas, dependiendo del tipo y clasificación de organismo vivo y/o animal al que se le describe dichos estímulos:

- “Anticinesis”: “retro-movimiento” o literalmente “tirón de movimiento”
- “Anticlisis” = “Rückbewegung”: *contra-flexión* = Gegenbewegung o contra movimiento. [(Anti) contra, y (klisis) la inclinación del movimiento del sol] Acciones no automáticas de los animales. El término “Antiklise” abarca todas las operaciones que antes se llamaba o significaba “conciencia”. La cuestión del modelo de lo “consciente” existe, pero para la fisiología comparativa no. “Bewussten” o consciente, tiene el sentido de contra inercia, neguentropía o contrapunto.
- “Antitipia”. Es el fenómeno de “Anticlisis” en los seres protoplasmáticos, unicelulares y en las plantas. Es también denominado “gegentype” o

---

<sup>258</sup> Beer Th., Bethe A., von Uexküll, J. (1899) *Vorschläge zu einer objectivierenden Nomenklatur in der Physiologie des Nervensystems*. Biologisches Centralblatt N° 19, pp. 517-521.

“Rückwirkung” es decir, “retroactividad” o mejor dicho “retroalimentación negativa”

Uexküll, Bethe y Beer explican que después de un estímulo, si se van acumulando impresiones de forma repetitiva en estos u otros estímulos anticinéticos diferentes, entonces se produce lo que llama “remanencia del estímulo”; es decir, lo que subjetivamente comprendemos como “memoria de estímulo” Actualmente esto es un factor de estudio para la definición de “**proceso cognitivo**” y su comprensión epistémica más allá de los comportamientos tróficos.

Es interesante observar que este aprendizaje conductual ha sido estudiado en la actualidad en dos formas de vida tan dispar como mohos mucilaginosos y en invertebrados:

- En cucarachas (*Periplaneta americana*): Watanabe H, Mizunami M (2007) **Pavlov's Cockroach**: Classical Conditioning of Salivation in an Insect. PLoS ONE 2(6): e529. doi:10.1371/journal.pone.0000529.
- Y en Mixomicetos (*Physarum polycephalum*): Saigusa, T., Tero, A., Nakagaki, T., Kuramoto, Y. (2008) **Amoebae Anticipate Periodic Events**. Physical Review Letters, 100(1): 018101

### Friedrich Nietzsche y Charles S. Peirce<sup>259</sup>

Los estudios experimentales de protozoos cautivaron a los filósofos de cambio de siglo del XIX al XX, quienes encontraron que estas investigaciones iluminan una amplia gama de problemas fundamentales en la intersección de la filosofía y las ciencias de la vida. Friedrich Nietzsche (1844-1900) y Charles Sanders Peirce (1839-1914), por ejemplo, se basaron en la investigación psicofisiológica en protozoos y del protoplasma cuando se considera la base fisiológica y química de complejas funciones psicológicas tales como el pensamiento, el sentimiento y el juicio.

Además de los investigadores que participan directamente en la investigación psicofisiológica en protozoos, muchos otros investigadores se basaron en estudios de organismos unicelulares al ilustrar sus propios argumentos sobre los principios y los procesos psicológicos. Importante entre ellos fue el filósofo alemán Friedrich Nietzsche, quien se refirió a “la nutrición primitiva” en protozoos como el “caso más simple” del movimiento voluntario en su conocida colección de escritos fragmentarios, *Der Wille zur Macht* [La voluntad de poder], publicado en 1906. “El protoplasma – explica Nietzsche en escritos que datan de finales de la década de 1880 – extiende sus pseudópodos con el fin de buscar algo que se resiste a ella, no a causa del hambre, sino por la voluntad de poder.” En otros escritos del mismo período, describió que las bases

---

<sup>259</sup> Schloegel, J. J., Schmidgen, H. (2002) *General Physiology, Experimental Psychology, and Evolutionism. Unicellular Organisms as Objects of Psychophysiological Research, 1877–1918*. Isis, N° 93, pp. 614–645, esp. p. 642.

fisiológicas de la percepción, el pensamiento y el juicio son como un proceso de asimilación similar a “la incorporación de la materia adquirida en la ameba.”<sup>260</sup>

A principios de la década de 1890 el filósofo norteamericano Charles Sanders Peirce igualmente reflejada sobre la base del protoplasma de las funciones psicológicas. En el artículo “Man’s Glassy Essence”, publicado en el *Monist* en 1892, Peirce tiene como objetivo formular - de una manera similar a Verworn - una “teoría molecular del protoplasma” que explicaría la relación entre los “aspectos psíquicos y físicos”. Sobre la base de su comprensión de las propiedades de las células y los organismos unicelulares, sostuvo que no había ninguna razón intrínseca por la cual no sería posible producir protoplasma artificialmente en el laboratorio. Sin embargo, también argumentó que esta sustancia viva es capaz de propiedades “extraordinarias”, tales como la formación de hábitos, sentimientos, y “todas las funciones de la mente”. Al igual que Jennings, Peirce volvió hacia los escritos de los psicólogos evolutivos William James y James Mark Baldwin le ayude a resolver la tensión entre estas afirmaciones. Él abandonó su intento de deducir los fenómenos psicológicos de eventos físicos, ya que se encontró con que una filosofía puramente mecanicista y no podía representar adecuadamente la condición inestable de protoplasma. En lugar de ello, argumentó, de manera similar a Haeckel y Verworn, que “los acontecimientos físicos no son sino formas degradadas o no desarrolladas de eventos psíquicos”. Peirce sostuvieron que la mente y la personalidad son, por tanto, inseparables de la materia. Lo que requiere de la existencia de una persona, concluyó, es que “los sentimientos de los cuales [una persona] se construye debe estar en conexión lo suficientemente cercana como para influir en otros”, al igual que los sentimientos se extienden a través de reacciones entre moléculas vecinas de protoplasma en las células y los protozoos.<sup>261</sup>

Como hemos podido constatar, en la historia de la biología celular, dedicada a los organismos protistas, de finales del siglo XIX y primer cuarto del siglo XX, se desarrollaron diversos aspectos fundamentales sobre los aspectos complejos de los comportamientos de los organismos primarios en el desarrollo tanto en la filogénesis como en la ontogénesis organizativa de los seres vivos. Dichos comportamientos, que

---

<sup>260</sup> Friedrich Nietzsche, *Der Wille zur Macht: Versuch zu einer Umwertung aller Werte* (Aus dem Nachlaß 1884-1888), vol. 2 (Leipzig: Kröner, 1906), p. 518; y Nietzsche, *Sämtliche Werke: Kritische Studienausgabe*, ed. Giorgio Colli y Mazzino Montinari, 15 vols., Vol. 12: Nachgelassene Fragmente 1885 hasta 1887 (Munich: Deutscher Taschenbuch Verlag, 1980), p. 209. En ese momento Nietzsche estaba en estrecho contacto con el fisiólogo José Paneth, un estudiante de Brücke, a quien visitaba con frecuencia en la estación marina en Villefranche-sur-Mer, cerca de Niza. En Paneth y Nietzsche ver Richard Frank Krummel, “Joseph Paneth über seine Begegnung mit Nietzsche in der Zarathustra-Zeit”, *Nietzsche-Studien* de 1988, Vol.17, pp. 478-495.

<sup>261</sup> Charles Sanders Peirce, “Man’s Glassy Essence”, en *Collected Papers of Charles Sanders Peirce*, ed. Charles Hartshorne y Paul Weiss, 8 vols., Vol. 6: *Scientific Metaphysics* (Cambridge, Mass.: Harvard Univ. Press, Belknap, 1965), pp. 155–177, en 155, 167, 173, 176. En la cosmología evolutiva de Peirce ver también Peirce, “The Architecture of Theories”, *ibid*, pp. 11-27; Peirce, “The Doctrine of Necessity Examined”, *ibid*, pp 28-45.; Peirce, “The Law of Mind”, *ibid*, pp. 86-113; y Peirce, “Evolutionary Love”, *ibid*, pp. 190-215. Estos ensayos aparecieron en serie con “Man’s Glassy Essence” en el *Monist* de 1891 a 1893. Ver especialmente “The Law of Mind”, pp. 101-102, para la discusión de Peirce de la extensión espacial de la sensibilidad en cuanto a los sentimientos de las amebas y otros seres protoplásmicos.

podemos actualmente considerar como adaptativos, jugaron un papel fundamental en el desarrollo fisiológico, donde el concepto de “psique” en los protozoos, jugó un papel fundamental en el desarrollo monista de la teoría celular, donde la vida y la materia se une con la mecánica fisicoquímica y la emergencia de fases conductuales sometidas a los tropismos y las taxias. Pero dichas conductas han estado en continua discusión en cuanto a la propia evolución de las definiciones de los tropismos. Tenemos el caso de Jennings donde discute las apreciaciones reduccionistas de Loeb sobre los tropismos, y las taxias en tanto que son conductas ligadas a las reacciones fisicoquímicas sin más. Mientras que Loeb abogó por un enfoque dinámico que llevaría a control de la conducta, Jennings argumentó explicaciones mecánicas estructurales diseñados para dar cuenta de la adaptación evolutiva.<sup>262</sup>

No obstante, con esto, descartamos también la condición de culpar de una débil epistemología al desarrollo de las investigaciones microbiológicas de finales del XIX y comienzos del XX por el hecho sociológico de la ciencia de que el ascenso de los partidarios del neodarwinismo y el surgimiento de la genética mendeliana fuese el origen de los rechazos de líneas de investigación que no estuvieran de acuerdo con los triunfos del momento. Me refiero por poner un ejemplo a la condena y al rechazo sin revisión alguna de los conceptos vitalistas que defendieron tanto Jakob von Uexküll como el de Hans Driesch que, siendo en sí de diferente naturaleza (para Uexküll era fisiológica / funcional, mientras que para Driesch era morfológico / orgánicista), fueron reducidos a una caricatura científica desprovista de valor investigativa. No sería hasta el último cuarto de siglo XX, cuando se restablecieron los estudios de Jakob von Uexküll tanto en el terreno de la teoría de los sistemas de Ludwig von Bertalanffy como en la nueva zoosemiótica de Thomas Sebeok y de la escuela de Copenhague para el nacimiento de los estudios biosemióticos actuales, y que ha tenido una revisión de sus fundamentos en las líneas teleomecanicistas o también llamadas vital-materialistas de Karl Ernst von Baer (Lenoir 1982; Castro 2009).

Los fundamentos cognitivos de los paramecios ofrecido por Jennings, ponen en relieve una confrontación epistemológica que, aunque no avanzó en la historia de la biología microscópica, no dejan de tener actualmente una correspondencia coherente con las características cognitivas mínimas que los organismos sin sistema nervioso (bacterias, paramecios o mixomicetos, entre otros) desarrollan en su funcionalidad biológica. Como dice David Koshland (1977) “*Un biólogo molecular moderno podría parafrasear al poeta Pope diciendo: El estudio apropiado de la humanidad es la bacteria*”.

---

<sup>262</sup> Es conocido como “el debate Loeb – Jennings” que, habiendo influido de forma creciente en las relaciones entre ambos biólogos experimentadores y su entorno con los evolucionistas del momento, no tuvo gran impacto para el desarrollo posterior de los fenómenos conductistas que surgirían de la mano de John Broadus Watson. No obstante, es importante comprender que mientras que Loeb enfocaba el tropismo en la relación del organismo con el entorno, enfatizando la reacción físico-química con los receptores de estímulos, Jennings desarrollaba su tropismo en función de los mecanismos subyacentes del organismo en tanto que subdivisiones de los protozoos para estudiar su reacción trófica mantenían sus condiciones intactas desarrollando una “teoría de la acción local de los tropismos” que chocaban con la versión uniformista de Loeb. Para profundizar en este debate ver: Pauly, P. J. (1987) *Controlling Life. Jacques Loeb & the Engineering Ideal in Biology*. Monographs on the History and Philosophy of Biology. Oxford University Press. pp, 123-129

## Ramón Turró y la base trófica de la inteligencia

*“Todo ser que vive y posee alma ha de poseer necesariamente alma nutritiva desde que es engendrado hasta que muere (...) La sensación, sin embargo, no es necesario que se dé en todos los seres vivientes (...) En cuanto al animal, éste si que ha de poseer necesariamente sensación dado que la Naturaleza nada hace en vano (...) Todo cuerpo dotado de capacidad de desplazamiento, y sin embargo, carente de sensación parecería sin conseguir su finalidad y ésta constituye la obra de la Naturaleza: pues ¿cómo podría nutrirse en tal supuesto”*

*Aristoteles. De Anima. 434 a 30, 434 b 0-5.*

No podemos dejar de sorprendernos en cuanto un biólogo puede fundamentar de una forma tajante una reflexión filosófica de base fundamental. El caso de Ramon Turró i Darder (1854-1926) es uno de estos casos. Este biólogo y filósofo, hizo múltiples aportaciones en el terreno de la fisiología, la inmunología, la bacteriología, y la veterinaria; al igual que en psicología, economía bursátil y márketing farmacéutico.

Siendo un biólogo de prestigio europeo, presidente de la Academia de Medicina de Barcelona en 1908-10, miembro del Instituto de Estudios Catalanes y socio fundador de la Societat de Biologia de Barcelona en 1912, en 1923 fundaría la Societat Catalana de Filosofia, junto con Jaume Serra i Húnter i Tomás Carreras i Artau. Turró proseguiría la idea característica de la escuela catalana - la unidad vital y funcional del organismo - y se esforzó por formularla y comprobarla de forma empírica y experimental.

Tuvo gran vocación hacia la biología y la filosofía, realizó importantes estudios sobre inmunidad biológica, para llegar a una concepción homeostática del organismo, claramente relacionada con la fisiología de Claude Bernard, creando en torno suyo un grupo de investigadores en fisiología experimental (Heliodoro Carpintero Capell, Alfredo F. Jácome-Roca, Francisco de Paula Martínez y Sáez, etc).

Reunió en su obra inspiraciones del evolucionismo de Herbert Spencer con otras que proceden de la teoría perceptiva de Hermann von Helmholtz e incluso llegó a recoger ideas de Iván Pávlov sobre el reflejo; pues en cierto modo la teoría de la inferencia inconsciente de Hermann von Helmholtz sirvió de modelo genérico para la inferencia trófica definida por Ramón Turró.

Su obra más importante fue *“Los Orígenes del Conocimiento: El Hambre”* (1912) seguida de *“La Base Trófica de la Inteligencia”* (1918); aunque previamente, entre 1910 y 1911 se publicaron los primeros fragmentos en la revista alemana "Zeitschrift für Psychologie und Sinnesphysiologie", con el título *"Ursprünge der Erkenntnis. Die physiologische Psychologie diciembre Hungers"*, al igual que la conferencia del VIII Congreso Internacional de Fisiólogos celebrado en Viena entre el 20 y el 30 de septiembre de 1910, con el título *“Physiologie de la faim”*.<sup>263</sup> Ramón Turró elaboró,

---

<sup>263</sup> Esmorís, L. - *Génesis y alcance histórico de la teoría del origen trófico del conocimiento de Ramón Turró*. En: Esmorís, L- Significado y alcance gnoseológicos de la teoría bio-genética del conocimiento de Ramón Turró. Trabajo de Tesis del DEA para el Doctorado de Filosofía. Universidad Complutense de Madrid. (fecha ignota)

durante la segunda década del pasado siglo, una teoría biogenética del conocimiento que hacía residir el origen de la actividad cognoscitiva de los organismos cognoscentes en el impulso trófico. Esta es una aportación de primer orden para entender el significado biológico mismo de la cognición – en palabras de Turró, del conocimiento – que exponemos lejos de ser un simple anecdotario histórico, por su vigencia.

Fundamenta la unidad funcional del comportamiento en las conexiones entre estímulos y respuestas, impulsadas y dirigidas por sistemas dinámicos motivacionales. Estos surgen de las necesidades primarias e, inicialmente, de las tróficas, que permiten seleccionar entre las respuestas del organismo las que las satisfacen, e incorporar sucesivamente a la conducta objetos y situaciones que se van articulando en forma de comportamiento inteligente. Turró construye su teoría, sobre todo, a partir de la teoría celular moderna y del concepto de “medio interno” o “milieu” inicialmente propuesto por Claude Bernard<sup>264</sup>, y lo hace circunscribiendo el contenido de dicha teoría al contexto del desarrollo ontogenético de los organismos cognoscentes.

De acuerdo con la teoría celular y el concepto de medio interno, Turró puede concebir la vida ante todo como un proceso metabólico incesante, esto es, como un proceso de incesante reposición o restauración, mediante la alimentación y consiguiente asimilación, de los materiales orgánicos celulares que componen el organismo y que éste continuamente gasta en el ejercicio de sus funciones. El único modo como el organismo podrá mantener la (relativa) “constancia” de su “medio interno”, esto es, las condiciones bioquímicas celulares de recurrencia de sus funciones, y de este modo asegurar su equilibrio “homeostático” con el medio “externo”, deberá ser tomando de éste, mediante la alimentación y consiguiente asimilación, el material capaz de reponer los materiales orgánicos celulares de los que está compuesto y que continuamente usa y gasta en el ejercicio de sus funciones. La alimentación constituye de este modo una condición funcional absolutamente básica e imprescindible del proceso metabólico, y por tanto del proceso mismo de autopreservación de la vida, o sea, del funcionamiento mismo recurrente del medio interno.<sup>265</sup> A su vez, y por lo que respecta a los organismos cognoscentes, Turró adoptará la perspectiva de su desarrollo ontogenético al objeto precisamente de percibir y comprender de qué modo es preciso cifrar en la función trófica de estos organismos el origen o la génesis misma de su actividad cognoscitiva.

Turró no acompañó, en este caso, de una continuada y rigurosa comprobación experimental, abundan en ella ideas similares a las que, por los mismos años, defendían Thorndike con su ley del efecto y Pavlov con sus reflejos condicionados y a las que más tarde expondría Hull sobre los mecanismos de reducción de necesidades e impulsos.

---

<sup>264</sup> Bernard, C. (1865) *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*. Paris / Leipzig: J.-B. Baillière et fils / Jung-Treuttel. En castellano: *Introducción al estudio de la medicina experimental*. Barcelona: Crítica (2005).

<sup>265</sup> Fuentes, J. B. (2010) *La Teoría del Origen Trófico del Conocimiento de Ramón Turró: Un Ensayo sobre su Trasfondo Histórico-Filosófico y sus Posibilidades de Desarrollo Teórico en el Sentido de una Concepción (Neo)Aristotélica de la Vida*. *Psychologia Latina*. Vol. 1, pp. 27-69.

*“La sensibilidad trófica no es una sensibilidad indiferente, que reacciona por manera indistinta delante de cualquier agente que le excite, sea mecánico, físico o químico; únicamente es sensible a las modificaciones que experimenta el medio interno. Es, por lo tanto, una sensibilidad de naturaleza química, capaz de diferenciar las distintas sustancias de las cuales se componen dicho medio, de manera específica. Si la sensibilidad fuera indiferente y reaccionara delante de toda clase de excitaciones, no se comprende cómo podría conservar la unidad de la composición del medio interno, y si esta uniformidad no fuese conservada, no se comprende tampoco cómo podrían autoregularse los procesos nutritivos.”* (Turró 1912)<sup>266</sup>

Defendió que la experiencia sensorial del sujeto es determinante para la auténtica percepción objetivante de la realidad, es decir, que existe una estrecha relación entre los fenómenos fisiológicos y los psíquicos.

Aunque Turró hizo sus reflexiones biológicas en contextos de metazoos complejos, se basó tanto en la experiencia celular como de organismos unicelulares. “Un consenso ‘funcional’ los religa los unos con los otros”. Esto es así des de un protozoo a un elefante, como de una célula cardíaca a un hígado. La sensación trófica es común para todos ellos. “Y como que sus afinidades son electivas, cuando el medio no les facilita la materia prima elaborable, la célula se resiente, y este cambio constituye aquello que denominamos excitación trófica. Como es sabido, Turró identificará, de acuerdo con la teoría celular, la base fisiológica del impulso de hambre en la vida celular – en el “*hambre celular*”, como nos dice – o sea en la ausencia bioquímica celular de nutrientes. El conocimiento se origina, de entrada, según Turró, con la primera experiencia impulsiva del hambre, mediante la que comienza por acusarse en la experiencia o la conciencia del organismo la ausencia de las sustancias nutritivas de las que éste ya comienza a carecer en su nueva vida y culmina, para lo que podríamos llamar cada *ciclo trófico-cognoscitivo*, con la experiencia de satisfacción de dicho impulso trófico, que se corresponde con la obtención y consumo de dichas sustancias. Mas, a su vez, para que dicho ciclo se cumpla, el organismo ha de llevar a cabo un proceso de aprendizaje conductual y cognoscitivo mediante el que va enlazando y coordinando, a través de su actividad orgánica motora, las diversas cualidades sensibles del mundo entorno con las que se va encontrando en el curso de dicha actividad con las diversas cualidades sensibles (específicas) de las sustancias nutritivas que necesita y que acaba por obtener y consumir, de suerte que es de este modo como aprende la condición de “signo” o “previsión” de aquellas primeras cualidades sensibles con respecto a estas últimas nutrientes.

Así pues, el conocimiento, o la cognición, principian para Turró bajo la forma de la experiencia o la conciencia (impulsiva) de una “ausencia”, y culminan con la experiencia (satisfactoria) de una “presencia”. Una experiencia de “ausencia” aquélla

---

<sup>266</sup> Turró, R. (1912) *Orígens del Coneixement: La Fam.* Societat Catalana d’Edicions, Barcelona. (1980) Edicions 62 i “la Caixa” Col. Les millors obres de la literatura catalana. Nº 32. Edición en castellano: *Orígenes del Conocimiento. El Hambre.* Ed. Minerva, Barcelona (1916).

que al principio ni siquiera podrá tener un contenido preciso o determinado, sino que más bien deberá presentarse como una suerte de avidez impulsiva imprecisa – como “*el estallido en la conciencia de un clamor*” que acusa una necesidad trófica incumplida, por decirlo con las expresivas palabras de Turró<sup>267</sup> – puesto que sólo cuando el organismo haya ido reiteradamente efectuando el mencionado proceso de aprendizaje es cuando podrá ir reconociendo y recordando, una vez experimentadas sus satisfacciones (específicas), los contenidos sensoriales nutrientes (específicos) que en cada caso apetece.

Turró remarcó el aspecto fundamental del equilibrio homeostático, preocupándose por explicar su desarrollo y características. El equilibrio es siempre el resultado de una satisfacción de necesidades y carencias que se originan en la actividad del organismo. Las necesidades son específicas, requieren sustancias específicas para su satisfacción, y despiertan respuestas concretas para su adquisición y apropiación. El conocimiento, que en nuestro discurso se identifica con la cognición, se centra en sus orígenes a través del hambre. Hay una sensibilidad o sintiencia (Deacon 2012) trófica para los alimentos, unos reflejos tróficos que satisfacen las necesidades, y todo un aprendizaje que asocia los signos de los objetos a los efectos que éstos producen en el organismo. El espacio táctil, abordando los problemas relacionados con el órgano del tacto y su representación. La inteligencia, tema que relacionó con su Teoría del conocimiento. Para Ramón Turró existe una base motivacional, el hambre, en el fondo de toda cognición, incluida la inteligencia, y de la conducta con la que se satisface aquella primordial necesidad.

En “*Las Bases Tróficas de la Inteligencia*”, Turró (1918) comenta que la sensación – según Helmholtz – “*es un signo que debe de ser interpretado*”. Entonces , “*la primera interpretación de que es objeto la sensación consiste en hacerse representativa de lo real que nutre; ella es el signo por medio del que colegimos su presencia exterior (...) Así la sensación, asociada al recuerdo trófico*<sup>268</sup> *despierta la previsión del efecto que el organismo debe de experimentar*”. Por eso, Turró la considera como signo de lo que ha de determinar ese efecto. Por él se entiende que en la cosa alimenticia hay algo incorporable, algo que sustente, algo que ha de ser “*plasma del plasma del organismo hambriento*”<sup>269</sup>

*“Donde falte la necesidad (el deseo) de reproducir el efecto trófico, donde falte el hambre celular, los signos representativos de de lo que puede satisfacerla son como las palabras que nada expresan: signos sin significación”*<sup>270</sup>

Este texto nos recuerda la explicación de la conducta de los tiburones, explicado por Uexküll (1926) que después de haberse saciado, los animales que forman parte de su régimen alimenticio ya no son portadores de significación y el tiburón pasa de largo.<sup>271</sup>

---

<sup>267</sup> Turró, R (1912) Opus Cit. p. 27. Palabras atribuidas a Leopold Levi.

<sup>268</sup> Lo que podemos considerar como memoria química.

<sup>269</sup> “El impulso de alimentarse es como el impulso sexual: aspira la posesión” Turró, R. (1918) *Las Bases Tróficas de la Inteligencia*. Editorial Triacastela, Madrid, 2010. pp. 92-93.

<sup>270</sup> Turró, R. (1918) Opus Cit. P. 93.

Importa asimismo advertir que la teoría de Turró, además de recoger influencias biopsicológicas clásicas como la pavloviana, o asimismo la de la teoría perceptiva de Helmholtz, supone una concepción biogenética del conocimiento de factura dinámica y constructivista que estaría próxima, por ejemplo, por lo que respecta a su aspecto dinámico-motivacional, al mismo Freud, o por lo que toca a su aspecto constructivista y operatorio, al propio Piaget<sup>272</sup>. De hecho, es precisamente la combinación entre estos dos aspectos, el dinámico-motivacional y el constructivista-operatorio, la que no sólo dota a dicha teoría de su contenido específico dentro del contexto particular en el que fue construida, que es el del desarrollo ontogenético de los organismos cognoscentes, sino la que asimismo le permite unas posibilidades de desarrollo que pueden ir más allá de dicho contexto especial en la medida en que pueden desenvolverse, como una teoría general biogenética del conocimiento que nos permita comprender el sentido funcional biológico del conocimiento en los organismos cognoscentes.

Turró ha adoptado, como decíamos, la perspectiva del desarrollo ontogenético al objeto de entender de qué modo el conocimiento, o la conciencia, o la vida psíquica misma, principian a raíz de la necesidad de satisfacer un impulso trófico cuya satisfacción ha quedado ya definitivamente suprimida con el comienzo de la nueva vida del organismo, cuando éste tiene que desplegar su actividad en el seno de su nuevo medio extrauterino al objeto de alcanzar y apoderarse de los nutrientes que se encuentran en éste. Pero esto supone ya formalmente que dichos nutrientes se encuentran en los alrededores extrasomáticos del cuerpo del organismo, y no de cualquier modo, sino precisamente a distancia respecto de dicho cuerpo, razón por la cual precisamente el organismo deberá dirigir su movimiento hacia ellos al objeto de alcanzarlos y apoderarse de ellos para poder ingerirlos, razón por la cual podemos a su vez comprender que el conocimiento, y no ya sólo el primer conocimiento o experiencia del hambre, sino asimismo y precisamente el conocimiento de dichos alrededores remotos, haya de ser biológicamente funcional a la hora de orientar – precisamente de orientar cognoscitivamente – dichos movimientos de modo que éstos alcancen su objetivo. Así pues, la explicación ontogenética del conocimiento de Turró, basada en el impulso del hambre, implica inexcusablemente, y precisamente para resultar a su vez inteligible o explicable, estos otros supuestos que acabamos de mencionar, a saber: la idea de que los nuevos nutrientes extrasomáticos, se encuentran remotos en los alrededores del organismo, razón por la cual es precisa la facultad motora que permita el movimiento

---

<sup>271</sup> Uexküll, en su *Theoretische Biologie* (1920) traducida al inglés (1926) p. 151, hace referencia que el comportamiento de los animales en los estados de hambre y saciedad, de forma que son atribuibles a cambios de irritabilidad de los órganos centrales pertenecientes al círculo de los alimentos. Para un tiburón recientemente hartado una sardina muerta simplemente no está allí, porque en su condición, el “umbral del estímulo” del tiburón es demasiado alto. Sin embargo, cuando el hambre disminuye, el “umbral del estímulo” también, y entonces la sardina aparece en el mundo perceptible del tiburón. Con lo que se comprueba que la percepción subjetiva del medio circundante dependerá no tan sólo de los círculos funcionales de la especie, sino también de los estados de irritación de los ciclos funcionales del sujeto. En pocas palabras, el “Umwelt” varía dependiendo de la estimulación o irritación de los círculos funcionales. Castro, O. (2009) *Jakob von Uexküll. El concepto de Umwelt y el origen de la Biosemiótica*. Trabajo de investigación para la obtención del DEA. Departament de Filosofia, Universitat Autònoma de Barcelona. p. 124.

<sup>272</sup> Fuentes, J. B. (2010) *Opus Cit.* p. 30.

del organismo capaz de alcanzarlos y apoderarse de ellos para ingerirlos, y la idea asimismo de que sólo mediante el conocimiento de dichos alrededores remotos el organismo podrá orientar y aprender el curso de sus movimientos de modo éstos alcancen su objetivo.

Se diría, por tanto, que Turró ha procedido, siquiera implícitamente, deduciendo el conocimiento del movimiento, como condición biológica necesaria de orientación del mismo, y éste a su vez de un modo determinado de alimentación, aquel que necesita alcanzar y apoderarse de los nutrientes que se encuentran remotos al cuerpo del organismo, pues sólo de este modo se nos hace inteligible su propia explicación ontogenética del origen trófico del conocimiento. Si cada ciclo trófico, como quiere Turró, comienza con la experiencia impulsiva de una ausencia alimenticia y culmina con la experiencia hedónica de la presencia del alimento que se acusaba como ausente, ello sólo puede ser así en la medida en que el conocimiento, y como conocimiento de los alrededores remotos en los que se encuentran los alimentos, se mantenga actuando a lo largo de todo el ciclo de modo que lo haga posible. Cosa ésta que, por lo demás, no ha dejado de reconocer Turró, al señalar que es preciso, para que cada ciclo trófico se cumpla, un proceso de aprendizaje motor y cognoscitivo mediante el que el organismo aprende la condición de “*signo*” de las cualidades sensibles ambientales con las que su actividad motora se encuentra respecto de las cualidades sensibles nutricias con las que cada ciclo termina.

El fisiólogo y filósofo catalán consideraba que las teorías del conocimiento racionalista y empirista rompen con la “unidad estructural y funcional del sistema nervioso”<sup>273</sup> porque desligan la sensibilidad o sintiencia trófica de la sensibilidad o sintiencia externa. Turró afirma que estas teorías no atribuyen ningún conocimiento a la sensibilidad o sintiencia trófica y que consideran que todo conocimiento procese de la sensibilidad o sintiencia externa o que esta en la memoria. Sin embargo, Turró sostiene que que la sensibilidad o sintiencia trófica es la que aporta el contenido a los estímulos externos, que se convierten en signos de aquello que se nutre. Sin la sintiencia trófica, los datos recibidos por la sensibilidad o sintiencia externa nunca podrán convertirse en signos de algo como hemos visto antes.<sup>274</sup>

Turró consideró el imperativo trófico contrario al imperativo kantiano apriorístico. Nacido de la sensación lo comprendemos como la necesidad de algo que resta para nosotros, incomprensible en sí mismo, aun cuando experimentemos la “observación” de su necesidad.<sup>275</sup>

---

<sup>273</sup> Turró (1912) Opus. Cit. p. 126.

<sup>274</sup> Esmoris, M. L. (2005?) *Génesis y alcance histórico de la teoría del origen trófico del conocimiento de Ramón Turró*. Extraído de *Significado y alcance gnoseológicos de la teoría bio-genética del conocimiento de Ramon Turró*. Trabajo de Investigación para la obtención del DEA en el Doctorado de Filosofía de la Universidad Complutense de Madrid.

<sup>275</sup> Turró dedica todo un capítulo a contrastar el imperativo trófico con el imperativo categórico en la primera parte de *La base trófica de la inteligencia*. Capítulo 11. El imperativo trófico y el imperativo kantiano

Diferenció las funciones psíquicas y fisiológicas, y formuló una teoría experimental de la mente humana, contra las posiciones nativistas de Inmanuel Kant y otros filósofos, procurando superar también el empirismo ingenuo que pretende explicar el conocimiento como producto directo y pasivo de la estimulación. Toda la filosofía del conocimiento de Ramón Turró quiere moverse asimismo en esta dirección de reinterpretar el apriorismo constructivista kantiano en un sentido corpóreo, o sea sensorial y operatorio —siguiendo en esto por cierto principalmente la estela de la concepción de Helmholtz de la percepción como percepción de signos interpretables mediante la acción

Para Ramón Turró la percepción aparece como una función autónoma respecto a la sensación, distinguiendo el funcionamiento sensorial-biológico del perceptivo-psicológico, en unas treinta y dos obras entre originales y reediciones.

No obstante, determina una misma sensibilidad o sintiencia trófica tanto en el caso de los organismos celulares, como en la vida de los animales o seres vivos complejos, salvando las distancias jerárquicas que invitan a un aumento de circuitos funcionales agenciales para su desarrollo. Turró (1912) lo expresa muy claramente en el origen de la sensación del hambre:

*“Debido al reflejo trófico, el organismo vive a cuenta de sí mismo. Nada tan natural como que este reflejo proporcione al medio interno la glucosa que le falta, o bien desdoblado el glucógeno, o bien por otros medios más indirectos y complicados: nada tan natural como que los tejidos le proporciona agua, sales, plasmas, regenerándolo y manteniendo la unidad de su composición; pero como hay un gasto efectivo, un quantum químico que se elimina al exterior, está claro que con esta autofagia continuada del organismo se acabaría agotando y la continuidad del proceso nutritivo se interrumpiría. Estas aguas, estas sales, estos plasmas, que los elementos celulares ceden a su medio ambiente, debe serles reintegrados de una forma u otra; si no sucumbirían por inanición.*

*La excitación trófica desprendida del elemento celular se extingue cuando se ha producido su efecto, y han estado conducidos al medio interno los principios, a falta de los que la determinaban; pero si, al encontrarse en medio del agotamiento las regiones celulares de donde salían aquellos principios no son reparadas las deficiencias de dicho medio, la excitación persistirá seguidamente mientras la restitución no venga. De acuerdo con la teoría de Pflüger, tenemos que admitir que esta excitación, por el solo hecho de persistir, en lugar de limitarse a recorrer el circuito reflejo que antes seguía, trascenderá a regiones más altas; y cuando así sean conducidas al medio interno las sustancias que le faltan, acabará estallando en la conciencia como una especie de clamor, acusador de una necesidad que no puede remediar esta sensibilidad oscura y silenciosa que hasta entonces había mantenido al organismo a costas de sí mismo. Así es como se determina el advenimiento del hambre” (pp. 26-27).*

En la actualidad, podríamos hablar primero de la necesidad de una clausura operacional que lleve a cabo la autopoiesis del agente. Pero dicho cierre necesita de una apertura al entorno para la seva persistencia. Y no puede haber persistencia si no hay ingestión de nutrientes. Por lo que dicho cierre o clausula operacional convive con la apertura al entorno en la consecución de la supervivencia, fundamentalmente por la nutrición.

En fase de inanición, el agente siente o es sensible a las deficiencias metabólicas, con lo que lleva a una acentuación de las necesidades, a la hora de una capacidad incrementada de motilidad a la hora de percibir un alimento.

En este momento, el organismo entra en una fase de aprendizaje funcional para la consecución de su alimentación.

*“Queda entonces, plantear un problema que sólo el tanteo o el aprendizaje empírico puede resolver: ¿qué quantum de inervación corresponde al quantum de excitación centrípeta para reblandecer el cuerpo y facilitar su deglución? Únicamente con sucesivas probaturas se llegará a la adaptación, y así resultará que se forjará (...) en la memoria (...) la presencia de signos (...) Similares conocimientos (...) se adquieren con la acción de un trabajo inductivo. Inducir es descubrir la relación que puede establecerse entre dos fenómenos aislados”.*  
(p.86)

El método de “ensayo-error” es el fundamento del aprendizaje que, como Jennings ya apuntó en su momento, será el camino de aprendizaje de todo organismo. Se aprenderá no sólo en los aciertos, sino también en los errores. La inferencia equivocada genera una memoria química que causa una retroacción del organismo, mientras que una acertada la genera de atracción.

El recuerdo del efecto trófico es un recuerdo nutrimenticio, una memoria química que distingue calidades nutricionales. El qualia de la dulzura – en la glucosa – es el signo que nos delata la presencia de algo cuya realidad acusa la sensibilidad o sintiencia trófica. Ahora bien, ni la glucosa es en sí dulce, ni la sal es en sí salada. Me pregunto entonces que tipo de “protoqualia” ha de existir en una ameba para que distinga calidades nutricionales en sus alimentos, por ejemplo el *Physarum polycephalum* y la distinción de la calidad de los copos de avena.

## Capítulo 6. Fundamentos de la Cognición

### Fundamentos cognitivos no-representacionistas

Para poder preguntarnos sobre la condición de posibilidad de cognición sin sistema nervioso en organismos como las bacterias o en los mixomicetos, antes que nada, hemos de revisar nuestros modelos del concepto de cognición. Han de ser analizados en rigor para poder después inferir nuevas aportaciones que permitan integrar de una forma consistente, rigurosa y robusta una mayor dimensionalidad de la definición de cognición en su descenso a niveles más elementales de la constitución biológica.

Los inconvenientes que han limitado esta condición de posibilidad de ampliar la definición de cognición de forma consistente son de múltiples factores:

La condición de la cognición estaba circunscrita a la actividad cerebral superior del ser humano y sus simuladores computacionales.

Superada esta etapa gracias a la “epistemología evolutiva” de la etología de Konrad Lorenz, y la “epistemología genética” de Piaget, la condición de posibilidad de la cognición se amplió biológicamente a los mamíferos superiores, desde el chimpancé hasta las ballenas y delfines. Pero las diferentes conductas de los animales con sistema nervioso – sea un calamar, sea una mosca de la fruta – también fue desarrollada su capacidad perceptiva como claves de la cognición, puesto que los artefactos-umbrales (tal como el cognitivismo describe a la neurona) son el fundamento último del estudio de la percepción.

Hasta bien poco el fenómeno cognitivo en organismos vivos siempre ha ido de la mano de un sistema nervioso – sea central o periférico – que resolviese con acelerada rapidez la conducción de las señales electroquímicas donde se estableciesen conatos de respuesta a interacciones con el mundo envolvente y las membranas celulares (bicapas lípidas) excitadas a partir de un determinado umbral<sup>276</sup>. Siempre en un medio extracelular interno al organismo superior que lo protege, el sistema nervioso se polariza y se despolariza para volver a repolarizarse continuamente – con sus periodos refractarios respectivos<sup>277</sup> – en una entrega y recepción continua de moléculas complejas

---

<sup>276</sup> El *umbral de excitación* hace referencia a la intensidad mínima que debe tener un estímulo para ser capaz de generar un *potencial de acción* en la neurona. De acuerdo a esto existen tres clases de estímulos según su intensidad:

1. Estímulo umbral, es aquel que tiene la intensidad mínima necesaria para generar un potencial de acción.
2. Estímulo subumbral (Infraumbral), que tiene una intensidad menor al mínimo necesario y por tanto no es capaz de generar potencial de acción.
3. Estímulo supraumbral, tiene una intensidad mayor al mínimo necesario y también es capaz de generar potencial de acción.

<sup>277</sup> Con un *periodo refractario* se hace referencia a un lapso en el cual la neurona no puede volver a ser excitada y ocurre durante la repolarización.

En un principio el período refractario es absoluto, porque la neurona no responde a ninguna clase de estímulo incluso los supraumbrales; para luego volverse relativo en donde sólo responde a estímulos supraumbral. ([http://www.profesorenlinea.cl/Ciencias/Sinapsis\\_potencial\\_bioelectrico.html](http://www.profesorenlinea.cl/Ciencias/Sinapsis_potencial_bioelectrico.html))

neurotransmisoras y neurotróficas, entre otras, para una apropiada conectividad “axón – dentrita” entre neuronas, una mayor plasticidad en las sinapsis y una buena guía.

Los neurotransmisores son las biomoléculas transmisoras de información de una neurona. Estas ejercen: una función de control sobre los ligandos y su interacción con los receptores celulares<sup>278</sup>, una función de control del transporte a través de la membrana<sup>279</sup>, una función de control del metabolismo de una enzima<sup>280</sup>, y una función de control del flujo iónico<sup>281</sup>, a parte de ser responsables de la alteración del potencial de acción.

Las neurotrofinas son una familia de proteínas que favorecen la supervivencia de las neuronas. Influyen en la arborización dentrítica en la corteza cerebral en desarrollo. También son moduladoras de sinapsis como, por ejemplo, la NGF o el factor de crecimiento nervioso, que es totalmente ajeno al quimiotropismo<sup>282</sup>; aunque otras permiten la quimioafinidad o la quimiorepelencia específica para establecer mayores circuitos estables, estableciendo así un factor guía<sup>283</sup> en la motilidad neural o axonal.

Ahora bien, mi cometido en este estudio está en poder mostrar posibilidades robustas de explicación del fenómeno de la cognición a través de sistemas complejos de circuitos funcionales que su composición bio-físico-química está por debajo del artefacto-umbral que es una neurona. De hecho la neurona es una célula que requiere de un entramado complejo de redes filamentosas en su citoesqueleto que permite la conducción de esos componentes bioquímicos tan exclusivos para la causalidad ascendente de conectividad neural múltiple, para la generación de redes (unas más complejas que otras) de

---

<sup>278</sup> Uniéndose a un receptor celular y produciendo una respuesta celular (agonista); uniéndose a un receptor celular y produciendo una respuesta celular inhibiendo parcial o completamente una respuesta a un agonista (antagonista). Uniéndose a un receptor celular como un agonista pero produciendo una respuesta similar a la antagonista (inverso-agonista). Incrementando la actividad de un receptor celular activando el lugar catalítico protéico (modulador alostérico positivo). Reduciendo la actividad de un receptor celular activando el lugar catalítico protéico (modulador alostérico negativo).

<sup>279</sup> Incrementando la recaptación de un neurotransmisor disminuyendo sus niveles extracelulares (potenciador de la recaptación). Inhibiendo la recaptación de un neurotransmisor aumentando sus niveles extracelulares (inhibidor de la recaptación). Induciendo la liberación de un neurotransmisor aumentando sus niveles extracelulares (liberador de la recaptación).

<sup>280</sup> Uniéndose a una enzima y aumenta su actividad metabólica (inductor enzimático). Uniéndose a una enzima e inhibe su actividad metabólica (inhibidor enzimático).

(<http://es.wikipedia.org/wiki/Neurotransmisor>).

<sup>281</sup> Facilitando el flujo de iones a través de los canales iónicos (abridor de canal). Dificultando el flujo de iones a través de los canales iónicos (bloqueante de canal).

<sup>282</sup> Esta molécula nunca actúa como molécula quimiotrópica, dado que su mensaje sólo aparece después de que los axones en crecimiento han alcanzado sus blancos.

<sup>283</sup> Un factor guía en la navegación neuronal se expresa en el momento y lugar adecuado para influir sobre la migración o extensión axonal de una población neuronal concreta, aportando estímulos permisivos y atractivos, o bien inhibitorios y repulsivos. Si se alteran o se suprimen factores de guía se producen alteraciones en las migraciones neuronales o en la extensión de axones; pero también tiene actividad quimiotáctica induciendo al axón o neurona a la fuente del factor guía (quimioatracción) o lejos de ella (quimiorepulsión).

La unión del factor guía a su receptor específico desencadena la activación de vías de señalización también específicas que, en su última instancia, inducen en la neurona un comportamiento determinado (atracción / repulsión). El enlace entre el receptor y las vías de señalización intracelular lo proporcionan elementos que actúan como mediadores en la transducción de la señal del factor guía en el citosol neuronal.

activación cerebral. Es posible que podamos entrever en las organizaciones complejas de sistemas de redes en colonias de abejas o de hormigas desarrollos homeomórficos a las redes neuronales.

De hecho en los pseudoplasmodios como el mixomiceto *Dictyostelium discoideum* veremos más adelante que su comportamiento multicelular que pasa de una babosa al desarrollo de un cuerpo fructífero con esporas no deja de ser la organización unificada de individuos celulares que se agregaron para desarrollar un individuo superior multicelular gracias a la normatividad ofrecida por la AMPc (un componente nucleótido que actúa como segundo mensajero en varios procesos biológicos, empleado en rutas de transducción de señales tanto exocelulares como endocelulares, o como regulador catabólico en bacterias) generando así un ciclo vital.

Querría destacar la relación existente entre la quimiotaxis para la migración neural y la quimiotaxis para la direccionalidad en la motilidad de los mixomicetos (Song y Poo 2001; Devreotes y Zigmond 1988; Song, et al. 2006) en la que se encuentra la PIB<sup>284</sup>, llamada Akt tan necesaria en la vía de señalización de determinados factores guía como el NGF o Netrina 1 (Guijarro 2006), o las proteínas enlazadas a la proteína G (Song y Poo 2001) también funcionando como receptor para quimioatrayentes concretamente en los pseudoplasmodios *Dictyostelium discoideum*. Esta afinidad provoca una entre otras muchas concordancias tanto fisiológicas como bioquímicas entre las células cerebrales, y los ameboides mixomicetos.

Pero la pregunta por factibilidad de la emergencia de la cognición en seres unicelulares, así como la construcción de esa emergencia cognitiva en ciertos compartimentos intracelulares como factores pre-cognitivos, nos lleva irremediablemente a la pregunta por la cognición de una neurona. Si cogiéramos una neurona la estudiásemos “in vitro” ¿procedería a desarrollar su capacidad de adaptación de forma consistente para preguntarnos por la posible cognición de dicha neurona? Seguramente no, porque su Umwelt natural no es el tubo de ensayo o la placa microscópica. Su Umwelt está en un estadio sináptico en red, flotando en masas blancas o grises dentro de un sistema cerrado craneal con tres capas intermedias entre neocortex y el cráneo. Pero hemos de pensar que ciertas propiedades emergen en su óptima construcción en los simuladores como en células autómatas. Por lo que tanto neuronas como bacterias, o amebas en general como los mixomicetos podemos estudiar si existen condiciones de posibilidad de conductas adaptativas que puedan y todo parecemos “inteligentes”; como si este “parecer” pasa a ser un juicio de valor a tener una consistencia robusta de argumentos científicos que permitan una adecuada interpretación de la conducta adaptativa evolutiva.

---

<sup>284</sup> PKB, llamada Akt es uno de los principales efectores de PI3K (fosfatidil inositol quinasa 3) encargado de fosforilar el fosfolípido minoritario de la membrana plasmática de una neurona. la PKB está también implicada en la supervivencia de la célula, a parte de la quimioatracción (Song y Poo 2001; Guijarro 2006).

Es por eso que estamos obligados a comparar las actuaciones de los organismos sencillos como los mixomicetos en su toma de decisiones sensor-motoras, con las actividades neurales en dicho desarrollo para comprender hacia donde podemos llegar a limitar en una causación descendente las actividades mínimas que permiten desarrollar los principios de cognición en organismos vivos.

Parafraseando a Hans Moravec<sup>285</sup> (1988) en su conocida paradoja:

*“En grandes porciones sensoriales y motoras altamente evolucionadas del cerebro humano tiene codificado mil millones de años de experiencia sobre la naturaleza del mundo y cómo sobrevivir en ella. El proceso deliberado que llamamos razonamiento es, creo, el más delgado barniz de pensamiento humano, eficaz sólo porque es compatible con este mucho más antiguo y poderoso, aunque por lo general inconsciente, conocimiento sensoriomotor. Todos somos prodigiosos olímpicos en las áreas perceptivas y motoras, tan buenos que hacemos lo difícil parezca fácil. El pensamiento abstracto, sin embargo, es un nuevo truco, tal vez de menos de 100 mil años de antigüedad. Todavía no lo hemos dominado. No es todo intrínsecamente difícil, apenas así lo parece cuando lo hacemos”*<sup>286</sup>

Ante toda esta actividad nerviosa la pregunta por la cognición biológica pasó a ser estudiada desde modelos de cognición artificial. El desarrollo de las ciencias cognitivas pasó por la fase cibernética cuyo fundamento reside en el desarrollo hacia la computación de la información, su facultad de procesamiento y la capacidad de respuesta (feedback) hacia las múltiples variables del entorno. Estrechamente vinculada a la teoría de control y a la teoría de sistemas, la cibernética nació allá por el año 1942 gracias a los trabajos de Nobert Wiener y Arthur Rosenblueth Stearns. Tenían como objetivo “el control y la comunicación en el animal y en la máquina”. De hecho ya Uexküll utiliza el término “cibernético” en referencia a los sistemas autoregulados, en los que se aplican el mecanismo de retroalimentación a través de los circuitos funcionales o ciclos de funcionamiento – Funktionkreises – como hemos explicado ya anteriormente. En su libro *Cybernetic*, Arthur Rosenblueth, fisiólogo con enfoque al sistema nervioso central, reta a Wiener a utilizar sus modelos matemáticos para reproducir el sistema automático de las redes neuronales que gobiernan el automatismo respiratorio. De hecho el espacio virtual que existe en las terminaciones dendríticas le hicieron imaginar la navegación en un espacio virtual de ahí que la cibernautica o los cibernautas traducen lo que él quería decir: *navegar en algo que existe pero que nadie ve*.

---

<sup>285</sup> Nacido en 1948 en Austria, Hans Moravec es profesor adjunto del Instituto de Robótica de la Carnegie Mellon University. Aclamado como futurista, Moravec ha desarrollado técnicas de visión por ordenador para detectar la región de interés de una escena (ROI), generó robots capaces de sortear carreras de obstáculos, nuevos enfoques la representación espacial en robótica como las redes de ocupación en 3D y entre otros logros está desarrollando un robot completamente autónomo capaz de navegar por su entorno sin necesidad de intervención humana.

<sup>286</sup> Moravec, Hans (1988), *Mind Children*, Harvard University Press.

Los avances de John von Newman en computación y en matemáticas provocó un gran avance en la cibernética a través de las células autómatas que llevan su nombre y su constructor lógico universal, que lo llevaron a conceptualizar la autorreplicación cibernética como un comportamiento de sistemas dinámicos que copian de forma idéntica el propio sistema dinámico. Las desviaciones de igualdad pueden proporcionar el desarrollo selectivo de la evolución hacia una mejor adecuación a las variantes del entorno y a la supresión de los desarrollos ineficaces para la supervivencia.

Ahora bien, el problema de las teorías selectivas en la perspectiva neodarwinista y las ciencias cognitivas reside en dos aspectos fundamentales que Francisco Varela, Evan Thompson y Eleanor Rosch (1991) expusieron con total claridad<sup>287</sup>:

1°. Que muy a menudo se invoca la evolución como una explicación de una clase de cognición que tenemos nosotros u otros animales. Esta idea hace referencia al valor adaptativo del conocimiento, enmarcada en la línea neodarwiniana clásica. Argumentaciones como por ejemplo que para cada grupo animal hay una explotación óptima de diferentes regularidades del mundo circundante. Cada grupo animal tiene su propia aptitud óptima.

2ª. Que el concepto de evolución se usa a menudo como fuente de conceptos y de metáforas para la construcción de teorías cognitivas. Es bien visible esto en teorías “selectivas” de la función cerebral y del aprendizaje.

“Sea cual fuere, la pregunta central es si los procesos evolutivos se pueden entender a través de la idea representacionista de que hay una correspondencia entre el organismo y el medio ambiente, suministrada por las restricciones optimizadoras de la supervivencia y la reproducción. Es decir, si el representacionismo en ciencias cognitivas es homólogo del adaptacionismo en la teoría de la evolución ya que la optimización cumple la misma función en ambas tareas”<sup>288</sup>.

Una de las tentativas para superar las incógnitas no resueltas por la selección natural entorno a la explicación de cada estructura, mecanismo, rasgo o disposición del desarrollo de los procesos evolutivos, ha sido modificar la *lógica prescriptiva* utilizada en el neodarwinismo por una *lógica proscriptiva* de la biología evolutiva postdarwinista. Varela, Thompson y Rosch (1991) hacen una descripción sumamente interesante al respecto. La *lógica prescriptiva* está fundamentada en la idea de que “*lo que no está permitido está prohibido*”, mientras que la *lógica proscriptiva* se fundamenta en la idea de que “*lo que no está prohibido está permitido*”. De este modo la selección darwiniana desecha lo que no es compatible con la supervivencia y la reproducción<sup>289</sup>. De este modo no sólo podemos observar con mayor amplitud de posibilidades la multiplicidad de la diversidad de las estructuras biológicas en todos sus

---

<sup>287</sup> Varela, F. J., Thompson, E., Rosch, E. (1991) *The Embodied Mind: Cognitive Science and Human Experience*. Cambridge, MA: The MIT Press. En español: *De cuerpo presente. Las ciencias cognitivas y la experiencia humana*. Editorial Gedisa (2005, 3ª reimpresión). pp. 225 y ss.

<sup>288</sup> Ibid. pp 226.

<sup>289</sup> Ibid. pp 227.

niveles, sino que también hacemos viable que *los procesos evolutivos se desarrollen por líneas de satisfacción y no como optimizadores*, es decir la selección ya no puede entenderse como un factor restrictivo hacia lo óptimo sino como un filtro que admite toda estructura que posea integridad suficiente para resistir.

En el curso de la evolución, los desarrollos sensorio-motores son tan ancestrales que han preservado su ser gracias al perfeccionamiento de su diseño, optimizándose continuamente. Esta paradoja de Moravec, que fue articulada por Marvin Minsky y Rodney A. Brooks, describe ante todo la complejidad que tiene la comprensión de la actividad sensorial y motora y su valor fundamental en el desarrollo de la Inteligencia Artificial. Sus fundamentos son tan originales que su perpetuidad en el tiempo exige una robustez no sólo fisiológica, sino también en el procesamiento de información tanto filogenético, como ontogenético e incluso de efecto Baldwin<sup>290</sup>, si se me permite.

Querría detenerme un momento en el desarrollo de Brooks de la inteligencia sin representación que fundamento un punto de inflexión en la IA, y que ha permitido establecer un parámetro fundamental en los procesos cognitivos enactivos en los que se prescinde el affordance o una percepción directa.

El profesor Rodney Allen Brooks de la Universidad de Cambridge expuso la posibilidad que se podían crear robots cuya estructura no necesitara de la dependencia del procesamiento de información por capas. Es decir, que un sistema inteligente se descompone en los productores de actividades independientes y paralelos que actúa toda la interfaz directamente con el mundo a través de la percepción y la acción, en lugar de una interfaz a la otra.<sup>291</sup>

En trabajos recientes, (Brooks, 1991a; 1991b; 1990), Brooks ha propuesto tres tesis fundamentales:

- Comportamiento inteligente se puede generar sin representaciones explícitas de la clase que la IA simbólica propone.
- Comportamiento inteligente se puede generar sin razonamiento abstracto explícito de la clase que la IA simbólica propone.
- La inteligencia es un emergente de la propiedad de ciertos sistemas complejos.

Brooks identifica dos ideas clave que han informado de su investigación:

- Situacionalidad y encarnación (o enacción en términos de Valera, Thompson y Rosch): La “inteligencia real” se encuentra en el mundo, no en sistemas sin cuerpo, como demostradores de teoremas o sistemas expertos.

---

<sup>290</sup> La descendencia seleccionada tendería hacia una mayor capacidad para aprender nuevas habilidades y no estar constreñida a habilidades genéticamente codificadas y relativamente fijas, poniendo el énfasis en el hecho de que el comportamiento sostenido de una especie o grupo puede modelar la evolución de las especies.

<sup>291</sup> Brooks, R. A. (1991) *Intelligence without Representation*. Artificial Intelligence Journal (47), pp. 139–159.

- La inteligencia y la emergencia: Un comportamiento “inteligente” surge como resultado de la interacción de un agente con su entorno. Además, la inteligencia es “en el ojo del espectador”; no es una propiedad innata aislada.

Brooks propone incrementar de forma gradual las aptitudes de los sistemas inteligentes en cada paso del camino, garantizado entonces que todos los componentes y sus interfaces sean válidos. Ahora bien, cada paso se debe de construir sistemas inteligentes completos que se incluirán en el mundo real, con capacidad de sensorial y con capacidad para actuar. Por lo que Brooks entiende como inteligencia la capacidad autónoma incorporada (es decir *in corpore*) o enactiva de estar en el mundo real coexistiendo con el entorno desarrollando fases funcionales.

Estas fases funcionales– conductuales son en realidad *actividades*. Están descompuestas estas actividades de más elemental a la más compleja de la siguiente forma: eludir objetos; andar; explorar; construir mapas; monitorear cambios; identificar objetos; planear cambios ante el mundo; razonar sobre conducta ante objetos.<sup>292</sup>

Según Brooks (1991a; 7) “La división fundamental de un sistema inteligente se encuentra en la dirección ortogonal que lo divide en subsistemas que producen actividad. Cada sistema productor de actividad o conducta conecta individualmente lo sensorial a la acción. Nos referimos a un sistema productor de actividad como una capa. Una actividad es un modelo de interacciones con el mundo. Otro nombre para nuestras actividades podría ser una aptitud, enfatizando que cada actividad se puede interpretar, aunque sea *post facto*, como en pos de cierto propósito. Empero, escogimos la palabra actividad porque nuestras capas deben decidir cuando actuar por sí mismas, no ser una subrutina que se invoca a pedido de otra capa.”

Brooks enfoca de una forma puramente efectiva la IA donde aquello que no funciona en IA no se puede defender, sino eliminar. No deja de tener cierto sentido evolutivo. Por lo que de las descripciones sobre el actuar o de la propia inteligencia, siempre está referida “a los ojos del observador”.

Dice Brooks (1991a; 2) que “es muy instructivo reflexionar sobre la forma en que Tierra, basada en la evolución biológica, ha invertido su tiempo. Las entidades unicelulares surgieron de la sopa primordial hace aproximadamente 3,5 mil millones de años. Mil millones de años pasaron antes de que aparecieran las plantas fotosintéticas. Después de casi otros mil millones y medio de años, unos 550 millones años atrás, llegaron los primeros peces y vertebrados, y los insectos hace 450 millones de años. Entonces las cosas comenzó a moverse rápido. Los reptiles llegaron 370 millones años, seguidos por los dinosaurios en 330 y mamíferos a 250 millones de años. Los primeros primates aparecieron hace 120 millones de años y los predecesores inmediatos a los grandes simios tan sólo 18 millones de años. El hombre llegó a su presente más o menos formato de 2,5 millones de años. Inventó una agricultura sólo hace 10.000 años,

---

<sup>292</sup> Brooks, R. A. (1986) *Archiving Artificial Intelligence through Building Robots*. AI Memo 889, MIT Artificial Intelligence Laboratory, mayo 1986.

escribiendo menos de 5000 años hace y con conocimiento ‘experto’ sólo en los últimos pocos cien años.

*“Esto sugiere que la resolución de problemas de comportamiento, lenguaje, conocimiento experto y la aplicación, y la razón, son todos bastante simples una vez que la esencia de ser y de reaccionar están disponibles. Esa esencia es la capacidad para moverse en un entorno dinámico, la detección de los alrededores en un grado suficiente para lograr el mantenimiento necesario de la vida y la reproducción. Esta parte de la inteligencia es donde la evolución ha concentrado su tiempo— esto es mucho más difícil.”*

Como vemos, Brooks sostiene que las cosas “simples” en relación con la percepción y la movilidad en un entorno dinámico tomaron evolución mucho más tiempo para perfeccionar, y que todas esas capacidades son una base necesaria para el intelecto “de alto nivel”.

Brooks pretende hacernos ver que realmente lo más complicado en la evolución ha sido desarrollar las bases fundamentales de cognición, sus principios mínimos, mientras que los desarrollos de capas superiores de mayor complejidad han evolucionado quasi exponencialmente. Es decir, llegar a la cognición en los organismos más simples ha requerido miles de millones de años para desarrollarse de forma óptima.

Curiosamente, y ligado íntimamente a la realidad biológica de los organismos sin sistema nervioso, sus robots perciben su Umwelt sin representarse dicho Umwelt en órganos de visión, sino con órganos de percepción (Merkorgan) constituidos por circuitos funcionales en paralelo.

Expone Brooks (1991a; 9) que lo que pretende es construir un sistema autónomo muy simple y completo, y probarlo en el mundo real. El ejemplo que utiliza es del de su denominada “Criatura”, un robot móvil que evita chocar con las cosas. Remite a la construcción de este sistema descomponiéndolo en partes, sin que por ello no deba de haber una clara distinción entre un subsistema de percepción, un sistema central y un sistema de acción. Incluso puede haber dos canales independientes que conecten la captación sensorial a la acción – uno para iniciar el movimiento, otro para las paradas de emergencia – así que no hay un solo lugar donde la “percepción” comunique una representación del mundo en el sentido tradicional del término. Por lo que, en resumidas cuentas no hay representaciones en las capas de sus Criaturas (Varela, Thompson y Rosch 1991; 245).

Brooks defiende abiertamente la tesis de Uexküll en tanto que cada organismo vivo percibe su propio Merkwelt basado en los niveles de complejidad de sus Funktionkreises que le permiten percibir el Umwelt particular de cada especie de individuos, y así con cada tipo de robot. “Con múltiples capas, la noción de la percepción entrega una descripción del mundo que se difumina aún más como parte del sistema haciendo que la percepción se extienda sobre muchas piezas que no son particularmente conectadas por rutas de datos o relacionadas por función. *Ciertamente,*

*no hay un lugar identificable donde la 'salida' de la percepción se pueda encontrar"* (Brooks, 1991; 6).

Ante la nula representación central de las percepciones, la idea clave es detectar el medio ambiente a menudo, y así tener una idea de puesta al día de lo que está sucediendo en el mundo. Entonces las capas individuales extraerán sólo aquellos aspectos del mundo que son relevantes proyecciones de una representación en un simple subespacio, si lo desea. Ahora, cada capa de control puede ser pensada como si tuviesen su propio propósito implícito (para el ojo del observador). Puesto que son capas activas, corriendo en paralelo y con acceso a los sensores, pueden monitorear el medio ambiente y decidir sobre la idoneidad de sus objetivos. A veces, las metas pueden ser abandonadas cuando las circunstancias parecen poco prometedoras, y otras veces circunstancias fortuitas pueden ser aprovechadas, por lo que las Criaturas *toman decisiones* en función de la percepción del entorno y sus variables. La idea clave aquí es que *se utiliza el mundo como un modelo propio* y para que coincida continuamente con las condiciones de cada objetivo contra el mundo real. Por lo tanto, como no hay una representación central, ni siquiera hay un sistema central. Cada actividad producida en la capa conecta la percepción a la acción directa<sup>293</sup>.

Por lo que Brooks afirma rotundamente que *"no hay necesidad de representación explícita de ni del mundo ni de las intenciones del sistema para generar comportamientos inteligentes para una criatura."* Es más, "no hay reglas que deben ser seleccionados a través de la comparación de patrones. No hay decisiones que tomar. En gran medida *el estado del mundo determina la acción de la criatura.*" Herbert Alexander Simon (1969) observó que la complejidad del comportamiento de un sistema no era necesariamente inherente a la complejidad de la criatura, sino tal vez en la complejidad del entorno<sup>294</sup>.

Nuestra hipótesis (siguiendo los trabajos de Agre y Chapman con los que Brooks concordó)<sup>295</sup> es que gran parte de la *actividad*, incluso a nivel humano, es igualmente un

---

<sup>293</sup> Ibidem

<sup>294</sup> Simon, H.A. (2009) *The Sciences of the Artificial*. MIT Press, Cambridge, MA.

<sup>295</sup> Casi al mismo tiempo que Brooks estaba describiendo sus primeros resultados con la arquitectura de subsunción, Chapman estaba completando su tesis de maestría, en la que informó de las dificultades teóricas con la planificación, y estaba llegando a conclusiones similares acerca de las insuficiencias del modelo de la IA simbólica él mismo. Junto con su compañero de trabajo Agre, comenzó a explorar alternativas al paradigma de la planificación de la IA [Chapman, D. and Agre, P. (1986) *Abstract reasoning as emergent from concrete activity*. En Georgeff, M. P. and Lansky, A. L., editores, Reasoning About Actions & Plans - Proceedings of the 1986 Workshop, pages 411-424. Morgan Kaufmann Publishers: San Mateo, CA.].

Agre observó que la mayor actividad cotidiana es 'rutina' en el sentido de que requiere poco - en su caso - razonamiento abstracto nuevo. La mayoría de las tareas, una vez aprendidas, pueden llevarse a cabo de una manera rutinaria, con poca variación. Agre propone una arquitectura agente eficaz que podría basarse en la idea de argumentos que se ejecutan. La idea es que, como la mayoría de las decisiones son de rutina, pueden ser codificados en una estructura de bajo nivel (tal como un circuito digital), que sólo necesita una actualización periódica, tal vez para manejar nuevos tipos de problemas. Su enfoque se puso de manifiesto con el sistema PENGI célebre [Agre, P. and Chapman, D. (1987). *PENGI: An implementation of a theory of activity*. En: Proceedings of the Sixth National Conference on Artificial Intelligence

reflejo del mundo a través de mecanismos muy simples, sin representaciones detalladas. Parafraseando a Brooks, no estamos tan preocupados de que pueda ser peligroso primero comprobar los principios mínimos cognitivos en organismos unicelulares sencillos, como las bacterias para luego añadir organismos sin sistema nervioso con capas más sofisticadas de control que las bacterias –por ejemplo con un desarrollo evolutivo gradual morfológico, como las mixobacterias que generan cuerpos fructíferos– como los mohos mucilaginosos o mixomicetos, porque la evolución ha tenido éxito utilizando este enfoque. De hecho los mixomicetos tienen la justificación de ser el punto de inflexión evolutivo entre organismos unicelulares plurinucleares (auténticos plasmodios como los *Physarum polycephalum*) y los organismos pluricelulares con transformación uniorgánica emergente (como los pseudoplasmodios *Dictyostelium discoideum*) y ambos taxones generan también cuerpos fructíferos para su supervivencia de la especie.

Por lo tanto, proponemos mirar a los seres vivos más simples como un modelo de abajo hacia arriba (bottom-up) para la construcción de la inteligencia. Es pronto aparente, cuando el “razonamiento” es despojado de distancia como el componente principal de la inteligencia de un robot, que la dinámica de la interacción del robot y su entorno son los principales determinantes de la estructura de su inteligencia.

Pongamos por ejemplo, la discusión de Simon (1969) antes citada de la hormiga caminando por una playa siguiendo el camino de una duna. Simon indicó que la complejidad del comportamiento de la hormiga es más un reflejo de la complejidad de su Umwelt que de su propia complejidad interna. Se especula que lo mismo podría ser cierto para los seres vivos más complejos, incluso en los seres humanos. Cada ser vivo tiene su Umwelt, o sea, su campo de percepción del entorno significativo para él, según sus circuitos funcionales. Pero la interacción entre el Umwelt y el Innenwelt es el fundamento de la complejidad emergente de una toma de decisión y, por lo tanto de la capacidad cognitiva de su especie, y la del individuo en particular que resuelve su interacción con el entorno, sea cual sea.

Vemos que es difícil trazar una línea entre lo que es la inteligencia y lo que es la interacción del entorno o del medio ambiente, en tanto que una conducta adaptativa. En un sentido, es coherente que sea que la conducta adaptativa determine la condición de posibilidad de la cognición, en la medida en que todos los sistemas inteligentes deben situarse en un mundo u otro si se quiere que sean entidades exitosas o útiles.

La idea clave de *la inteligencia* para Brooks es que *está determinada por la dinámica de la interacción con el mundo*.

Al discutir donde reside la inteligencia en un programa de inteligencia artificial, Minsky (1968) señala que "nunca hay" corazón "en un programa", sino más bien que, si nos fijamos, "nos encontramos con bucles y secuencias de operaciones triviales sin sentido".

---

(AAAI-87), pages 268-272, Seattle, WA.]. PENGI es un juego de ordenador simulado, con el personaje central controlado mediante un régimen como el descrito anteriormente.

<sup>296</sup>Es difícil señalar a un solo componente como la sede de la inteligencia. No hay homúnculo. Más bien, *la inteligencia surge de la interacción de los componentes del sistema*<sup>297</sup>.

La funcionalidad inteligente del sistema en su conjunto, tales como la percepción, la planificación, el modelado, el aprendizaje, etcétera – surge de la interacción de los componentes.

No es factible identificar el asiento de la inteligencia dentro de cualquier sistema, sea IA o organismo vivo, ya que la inteligencia es producida por las interacciones de muchos componentes. Inteligencia sólo puede ser determinada por el comportamiento total del sistema y cómo el comportamiento aparece en relación con el medio ambiente.

La idea clave de emergencia para Brook es que *la inteligencia está en el ojo del observador*.

Brooks ha estado totalmente convencido durante estos más de veinticinco años de investigación que los tipos de capas que produce la actividad de control de que estamos desarrollando (movilidad, visión y tareas de supervivencia relacionada) son requisitos previos necesarios para la inteligencia de más alto nivel en el estilo que atribuimos a los seres humanos. Por lo que configuran, tanto en IA como en biología los fundamentos no-representacionales de los principios mínimos cognitivos.

### **Fundamentos de la Cognición Mínima.**

Hemos argumentado, que el tipo de actividades que se suelen pensar cómo una demostración de la inteligencia en los seres humanos han tenido lugar por sólo una fracción muy pequeña de nuestro linaje evolutivo. De este modo sostenemos entonces que las cosas más “simples” en relación con la percepción y la movilidad en un entorno dinámico tomaron evolución mucho más tiempo para perfeccionarse, y que todas esas capacidades son una base necesaria para el intelecto “de alto nivel”. Es decir, que sin unos principios mínimos cognitivos robustos evolutivamente no es posible la cognición superior. Dichos principios cognitivos mínimos “minimizan”, valga la redundancia, el esfuerzo de un desarrollo de la consciencia, del lenguaje y su producción inteligente. Ergonomizan la emergencia de las facultades superiores de la cognición ofreciendo rutinas que no precisan de una atención intensa para su desarrollo, puesto que funcionan automáticamente y permiten una pluriactividad de objetivos de mayor complejidad efectiva. Pongamos como ejemplo, tener puntería a la hora de tirar una pelota a su meta (básquet o portería de fútbol, o de hoquei, etc.) Ningún deportista, o un niño que se esfuerza en tener puntería se dedica a hacer cálculos físico-matemáticos de la trayectoria parabólica y sus efectos, así como la predicción del engaño perceptivo que un contrario que quiera evitar el gol lo perciba por cálculos algorítmicos que pueda realizar los cerebros de los participantes. La coexistencia de los desarrollos “simples” de cognición,

---

<sup>296</sup> Minsky, M. L. (ed.) (1968) *Semantic Information Processing*. MIT Press, Cambridge, MA.

<sup>297</sup> Este también es el problema de la ubicación del Self, del mí mismo o “yo”, tal como lo plantea Rodolfo Llinas en “*El cerebro y el mito del yo*”. Editorial Belacqua (2003).

como la percepción del entorno y los obstáculos, la toma de decisión de elección de diferentes oportunidades para marcar gol, o de pasarle la pelota a un compañero que, según la percepción individual y/o colectiva puede tener mayores oportunidades de encajar el gol, etc. Son actividades complejas fundamentadas por elementos simples de cognición en su capacidad de actividad. Lo difícil es que la capacidad de procesar toda esta información no quede entorpecida por una reflexión superior que requiere de una velocidad inferior de procesamiento. La inteligencia instintiva de los jugadores no puede estar interferida por la inteligencia racional, por lo que los procesos de cognición simples pasan a ser los actores en primer plano para la ejecución de la actividad, coexistiendo entre ellos y evaluando directamente la situación del entorno para ejecutar con acierto el tiro con puntería, o el pase oportuno. Por lo que podemos comprobar que la inteligencia instintiva actúa sin necesidad de representación, sino a través de la percepción directa del entorno, aunque en su proceso ejecutivo enactiva lo que Gibson (1972, 1977, 1979) denomina “affordances” o “provisiones”. Éstas son las posibilidades de uso, intervención y acción que el mundo físico ofrece un agente determinado y se determina por el “ajuste” entre las capacidades físicas del agente, las competencias y las acciones-propiedades relacionadas del entorno en sí (Clark 1999). Por lo que nosotros no vemos incompatibilidades en la enacción de la percepción por capas sin necesidad ni de representación ni de razonamiento con las percepciones directas de las affordances, a diferencia de Varela y colegas, puesto que no interfiere las affordances superiores en los procesos por capas de las actividades sensorio-motoras que permiten que la acción sea guiada por la percepción, partiendo de lo que Varela y colegas denominan “acoplamiento estructural del animal”, y que en nuestro caso de los mixomicetos, podemos hablar de “percatación” a través de “encaje teleonómico”. No pensamos en que haya en el caso que planteamos un aspecto exclusivo del medio ambiente, pasando por alto la unidad estructural del perceptor (acusaciones contra Gibson) sino que hay una basculación Umwelt –Innenwelt, a través de los circuitos funcionales o Funktionkreises que permiten una Gegenwelt o “contra-mundo” uexküliano que difiere de ser una representación del mismo, sino una decodificación de las señales percatadas por el organismo perceptor, sea una bacteria de un intestino como el ser vivo que contiene esas bacterias en sus órganos, desde un mixomiceto hasta un ser humano, al igual que sus componentes celulares (desde los linfocitos hasta las glías, etc.).

¿Pero a que llamamos “percatarse”? Hemos utilizado este término adrede, para contrastar el propio concepto descrito por Chalmers (1996) como correlato psicológico de la conciencia.

Querría antes ofrecer la descripción básica que el profesor Jeffrey B. Stock del Departamento de Biología Molecular de la Universidad de Princeton hace con respecto a las bacterias como seres “inteligentes”. ¿Qué entendemos por inteligencia? No es realmente todo organismo que pretende comunicarse con otros, eso no es lo que la inteligencia se trata. La inteligencia es, según Stock<sup>298</sup>, *tomar la información del medio*

---

<sup>298</sup> Ver <http://www.abc.net.au/radionational/programs/allinthemind/the-secret-life-of-bacteria---small-smart-and/3192228#transcript>

ambiente y la toma de decisiones que son ventajosas para el organismo según los datos procesados del entorno (Stock y Zhang 2013). De hecho el colega y amigo de Stock, el profesor de bioquímica de la Universidad de California, Daniel Koshland Jr, demostró en la década de 1970 que las bacterias tienen una forma de memoria<sup>299</sup>. Antes de su fallecimiento, Koshland había afirmado que no hay duda de que las bacterias son los organismos más inteligentes en la tierra, por lo menos sobre una base de peso por gramo porque son muy pequeños.

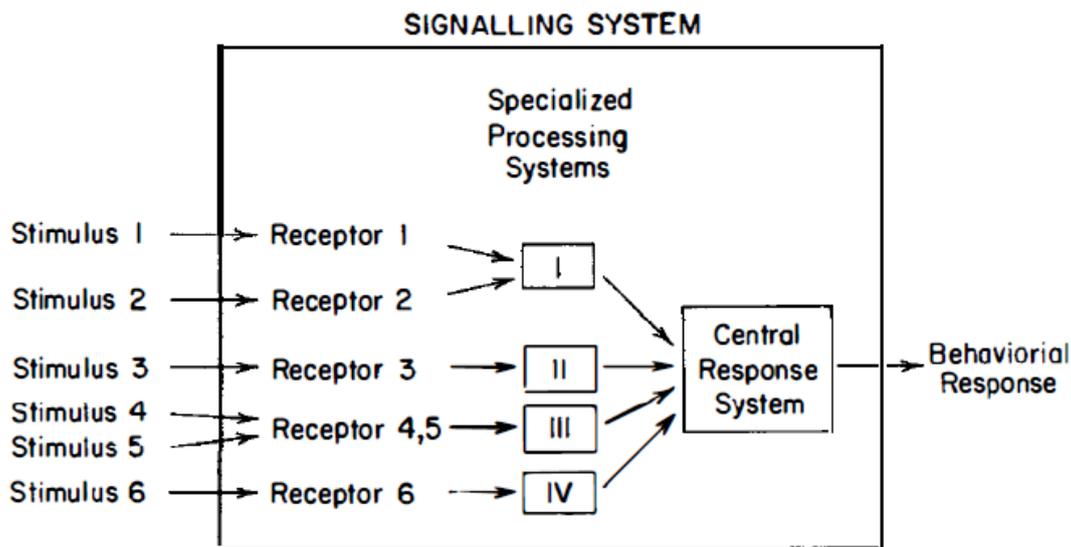


Fig. 22. Procesamiento de señales en una sola célula. Los estímulos externos activan los receptores, que transmiten información a las partes de procesamiento especializado del sistema y luego van a una red central integradora de respuesta. La salida es la respuesta de comportamiento de volteo en la bacteria, o también una señal eléctrica o una liberación de neurotransmisores en el caso de una neurona. Fuente: Koshland, D. E. (1980a) *Bacterial Chemotaxis in Relation to Neurobiology*. Annual Review of Neuroscience. Vol.3, pp. 43–75.

La percatación en el caso de bacterias está en la detección del quorum sensing. Y es a través del quorum sensing que hay distinción de elementos del entorno hostiles, como de alimento “dulce” como el azúcar. Pero ¿cómo hablamos de percatación en una bacteria? ¿A caso la bacteria percibe el qualia de “dulzor” del azúcar? ¿Es legítimo atribuir a un organismo sin sistema nervioso un fenómeno de percatación? La respuesta es que depende de lo que definamos como “percatación”. Entendemos que los detalles del entorno están cognitivamente distinguidos en la percatación, según Chalmers (1995). Es más, queda definida como *la disponibilidad directa del control global*. Es decir, un sujeto se percata de alguna información cuando dicha información está disponible directamente para ser utilizada en la dirección de una amplia gama de procesos conductuales. Esto tiene en cuenta la posibilidad – según Chalmers – de la experiencia en animales no humanos y también cuadra perfectamente con el criterio de informatividad. En los casos en que la información fuera comunicable, está por lo

<sup>299</sup> Koshland D. E., Jr. (1977) *A response regulator model in a simple sensory system*. Science N° 196, pp. 1055–1063

general está disponible para el control global (por ejemplo, en la dirección deliberada de una amplia variedad de conductas. Aunque Chalmers nos diga que no podemos ir más allá, por carencia de instrumentos mesurables que permitan la confirmación de esta hipótesis, nosotros creemos que es posible ir más allá de los mamíferos para medirla. Para nosotros la carencia tecnológica de la medición no implica la no existencia de percatación en el “top down” de la filogénesis. Al contrario, supone un enorme desafío para la investigación de los comportamientos adaptativos de los microorganismos y protistas en general. La aceptación de la percatación sin representación en organismos sin sistema nervioso ofrece una mayor profundidad y riqueza biosemiótica de la descripción e interpretación de los sistemas regulatorios y los sistemas sensitivos que se autoregulan la captación del medio circundante (Koshland 1980a; Koshland, Goldbeter y Stock 1982), amplificando tanto la recepción de señales como su naturaleza sensitiva, así como también la discriminación de señales perturbadoras como la distinción de los elementos del entorno respecto del ruido. Quizás no modifica la descripción fisiológica básica de dichos mecanismos, pero si puede permitir la comprensión de una mayor interrelación de mecanismos aún no estudiados en profundidad, como los umbrales de sensibilidad y su relación de su comportamiento con ciertas leyes vinculadas con la psicofísica, útiles para la descripción de lo que pasa en dichos umbrales (tanto de hiposensibilidad o subsensibilidad como de hipersensibilidad) y que describiremos más adelante.

Entendemos que los procesos cognitivos toman su sentido en un contexto evolutivo. Podemos poner en tela de juicio si los modelos representacionistas son los modelos cognitivos que alcanzan el zenit evolutivo por sí mismos, o si se fundamentan en modelos no-representacionistas primitivos que permiten lo que podemos denominar una causación ascendente de procesos cognitivos superiores. Esto provoca otras preguntas que van en hilo con la anterior pregunta, es decir, si existen procesos cognitivos primitivos en los inicios de la evolución de las especies. Pero también provoca la pregunta si existen modelos no representacionistas de cognición en los organismos vivos, mejor dicho, si estos modelos forman parte de un fundamento de base para el desarrollo cognitivo, donde los protistas y todos los organismos sin sistema nervioso tienen percepción sin representación.

En los últimos años, se debate cada vez más la cuestión por lo que define los límites más bajos de la cognición (Beer, 2003; Keijzer, 2003a; Lyon, 2006a; Moreno, Umerez y Ibañez, 1997; Moreno y Etxeberria, 2005). Dentro del campo de la cognición encarnada y situada, muchos investigadores han optado por organismos similares a insectos como punto de partida (Beer, 2003; Brooks, 1999). Sin embargo, esto parece ser un punto de partida bastante arbitraria, y, de hecho, una pequeña minoría de investigadores ha perseguido la idea de la cognición mínima examinado procariotas, los organismos más simples que existen (Bitboll y Luigi, 2004; Lengeler, Müller y di Primio, 2000; Lyon, 2006a; di Primio, Müller y Lengeler 2000). En este apartado<sup>300</sup>, vamos a centrarnos en

---

<sup>300</sup> Hemos desarrollado diversos aspectos del trabajo del professor Marc van Duijin, de la University of Groningen en este apartado puesto que ha sido uno de los pioneros en el desarrollo de los principios

las bacterias con el fin de volver a la cognición mínima, y preguntar cuáles son las implicaciones que la cognición mínima puede tener para la noción de cognición en sí y el estudio de la cognición en general. Este estudio fue desarrollado por Marc van Duijin, de la University of Groningen que nos impulsa la condición de posibilidad de generar un primer peldaño en la escala evolutiva de la biocognición y sus principios mínimos con los mixomicetos, como enlace entre las procariotas y los eucariotas protistas.

En relación con estas ideas, se discute el trabajo teórico por Moreno, Etxeberria y varios colaboradores, que argumentan que los sistemas nerviosos son una condición necesaria para la cognición. Por el contrario, sostenemos que las formas más elementales de la cognición ya pueden ser testigos en procariotas, y posteriormente lo veremos también en los mixomicetos, poseyendo lo es en algunos aspectos un análogo sensoriomotor molecular del sistema nervioso en ambos casos. En la sección siguiente, se proporciona el caso de la bacteria *Escherichia coli* y nos centramos en su sensoriomotor molecular, o el sistema TCST, para venir a nuestra cuenta de la cognición mínima, y distinguirlo de las formas más básicas de adaptación ontogenética. En nuestra opinión, la cognición mínima requiere una realización que consiste en un mecanismo de acoplamiento sensoriomotoras que subsume a la red metabólica / autopoietica básica y que se concreta en los factores regulativos; preparamos el terreno de la idea cada vez más popular que la cognición gira en torno al acoplamiento sensoriomotor. Terminamos con un resumen de lo que creemos que son las implicaciones de esta interpretación de la cognición mínima para el estudio de la cognición.

### **Los sistemas nerviosos y el dominio cognitivo**

Moreno y colaboradores (por ejemplo, Moreno, Merelo y Etxeberria, 1992; Etxeberria, Merelo, y Moreno, 1994; Moreno, Umerez, y Ibañez, 1997; Barandiaran y Moreno, 2006; Moreno y Etxeberria, 2005) consideran el dominio cognitivo de ser un subdominio claramente delimitada del dominio biológico. En su opinión, el dominio biológico se caracteriza por las reacciones metabólicas básicas que ya están presentes en las formas de vida mínimas, y se extiende hasta basada en el metabolismo de comportamiento s, o lo que ellos llaman "la agencia metabólica". Por ejemplo, Moreno et al. (1997) afirman que el comportamiento sensoriomotor en organismos sin sistema nervioso sigue siendo una parte intrínseca de las funciones metabólicas, que carecen de los requisitos de organización adecuados que permiten a los organismos sin sistema nervioso para iniciar más que meras reacciones metabólicas: "Los movimientos flagelo

---

mínimos cognitivos en procariotas. Su estudio sobre los factores sensoriomotores para la constatación de principios mínimos cognitivos en bacterias, especialmente en *E. Coli* marcó un punto de inflexión para mi desarrollo en los estudios de los principios mínimos cognitivos en los mixomicetos. van Duijin adopta un enfoque estrictamente biogénico, cosa que nosotros no adoptamos *stricto sensu* por desarrollar aspectos de la IA como factor aplicativo a la contribución de la conducta adaptativa inteligente. Sí que empatizamos con el desarrollo biogénico en el sentido de que permite hacer la distancia escalar entre los principios mínimos cognitivos en los organismos sin sistema nervioso y los seres vivos más complejos como los simios, delfines o seres humanos. van Duijin, M. (2012) *The Biocognitive Spectrum. Biological Cognition as Variations on Sensorimotor Coordination*. Ph.D. Thesis University of Groningen. Capítulo 2. pp. 47-62

implicadas en la locomoción orientada en ciertos tipos de bacterias pueden caracterizarse de manera equivalente como modificaciones en las rutas metabólicas” (Ibid. , P. 112).

En su opinión, la cognición mínima requiere un tipo más complejo de la realización, que permite llamadas “funciones meta-metabólicas” que trascienden los procesos basados en el metabolismo por lo que el mantenimiento de Moreno y colaboradores llaman un “dominio independiente de los patrones”. Para generar estos patrones de metabolismo independiente, los organismos requieren un mecanismo sensoriomotor dinámica de desvincular de ritmo rápido. Esta llamada “dinámica de desacoplamiento” de los patrones sensoriomotores se argumenta para mediar un rápido flujo de información sensoriomotriz, aislada de la intervención de los procesos metabólicos más lentos (Moreno y Etxeberria, 2005, p. 168). Moreno y colaboradores sostienen que el sistema nervioso permite la disociación dinámica de patrones sensoriomotores, proporcionando así los organismos con un dominio sensoriomotor interno, autónomo. El sistema nervioso es representado como una meta-organización dentro de una organización metabólica general, que es compatible con una forma de control sobre los procesos meta-metabólicos, como a través de los patrones sensoriomotores. Al menos en este punto de vista, el sistema nervioso marca claramente la división entre lo biológico y el dominio cognitivo. Como Moreno et al, (1997) afirman:

*[...] El sistema nervioso es el soporte material de la fenomenología cognitiva como un nivel autónomo con respecto al resto del dominio biológico. La cognición aparece como consecuencia de la aparición del sistema nervioso. (p. 116)*

Recientemente, sin embargo, el argumento de que el sistema nervioso es esencial para la generación de la conducta cognitiva ha sido cuestionado por Lengeler, Müller y di Primio (2000), di Primio, Müller y Lengeler. (2000) y Müller, di Primo y Lengeler. (2001), quien demostraron convincentemente que la evolución de los sistemas nerviosos no era tanto un hito en la evolución de la cognición, sino más bien un aumento y ampliación de las capacidades que ya existen en los organismos unicelulares (véase también Bitboll y Luigi 2004; Lyon 2006a Taylor 2004). Müller, di Primo y Lengeler (2001) realizaron una lista de algunas de las capacidades mínimas cognitivas que se pueden encontrar en procariotas actuales, tales como *acoplamiento indirecto y modificable de estímulo-respuesta, la memoria, la adaptación, e incluso la cooperación*, satisfaciendo así la definición de libros de texto bien conocido incluso de Neisser (1967) de la cognición, es decir, “*todos los procesos por los cuales la información sensorial se transforma, se reduce, se elabora, se almacena, se recupera y se utiliza*”.<sup>301</sup>

Aunque las bacterias, obviamente, no poseen sistema nervioso, la mayoría encarnan un mecanismo sensoriomotor molecular que se asemeja funcionalmente a algunas de las características sensoriomotoras de los sistemas nerviosos. El descubrimiento del *sistema de transducción de señales de dos componentes* (TCST), un sistema sensoriomotor

---

<sup>301</sup> Neisser, U. (1967). *Cognitive psychology*. New York: Appleton- Century Crofts.

molecular en las bacterias, ha alterado de manera significativa la forma en que la complejidad del comportamiento bacteriana es vista por los microbiólogos de hoy en día. Taylor (2004) explica que el descubrimiento del sistema TCST fue un hallazgo como punto de interés:

*(...) Porque representaba la primera elucidación de un mecanismo molecular para la adaptación [fisiológica] y la memoria. El descubrimiento también dio algunos neurofísicos apoplejía porque creían que se necesitaba un sistema nervioso para la adaptación y no podían concebir un sistema sensorial completa en una sola bacteria (p. 3671)*

Aunque la organización sensomotora del sistema TCST depende y es sostenida en última instancia por la actividad metabólica, la organización sensomotora es organizativamente autónoma. Funcionalmente similar al sistema nervioso, el sistema TCST da lugar a patrones sensoriomotores que trascienden puramente funciones del metabolismo relacionados (Alexandre y Zhulin, 2001; Taylor y Zhulin, 1998). Teniendo en cuenta estos resultados, creemos que una mejor comprensión de la cognición mínima se puede obtener mirando más de cerca el comportamiento bacteriano.

## **Estudio de un caso: La bacteria *Escherichia coli***

En este caso de estudio, nos concentramos en el comportamiento de la quimiotaxis de la bacteria *E. coli*, y el funcionamiento de su sistema de TCST (Sistema de transducción de señales de dos componentes), un mecanismo sensoriomotor molecular, que se compone de dos “ramas” o caminos, uno para la percepción y la otra para la adaptación. Por medio de comparación temporal, las bacterias son capaces de detectar cambios sutiles en gradientes de productos químicos, de manera que pueden desplazarse hacia los gradientes de productos químicos atrayentes y repelentes; un comportamiento denominado “quimiotaxis” (por ejemplo Koshland, 1977; Boyd y Simon, 1982).

### **El comportamiento quimiotáctico en *Escherichia coli***

Es bien sabido que la fototaxis se puede generar mediante la colocación de dos sensores de luz en la parte delantera de un vehículo autónomo, que impulsa hacia la luz mediante el mantenimiento de un nivel igual de estimulación en ambos sensores (por ejemplo Braintenberg, 1984). Sin embargo, debido a las limitaciones de tamaño, la evolución ha favorecido mecanismos de detección temporales más que espaciales a nivel bacteriano (Dusenbery, 1998). *E. coli* posee un total de cinco tipos de proteínas transmembrana que funcionan como receptores, cuatro de los cuales se encargan de la señalización transmembrana para el sistema TCST<sup>302</sup> (Berg, 2000). Cada bacteria posee un total estimado de 8000 de dichos receptores de encendido / apagado, cada una

---

<sup>302</sup> El sistema TCST o “sistema de transducción de señales de dos componentes” no es el único que es utilizado por bacterias entéricas (de vida intestinal), existe abundante evidencia de que existen otras formas menos conocidas de taxis que se basan en diferentes vías subyacentes, que pueden o no compartir componentes comunes como la fosfodependencia o de detección dependiente de MCP (metil-aceptación de las proteínas) (véase también Alexandre y Zhulin, 2001; Lengeler y Postma, 1999).

equipada con múltiples puntos de unión, y sensibles a una amplia gama de concentraciones extracelulares de los productos químicos. Cuando los atrayentes o repelentes atracan en estos receptores, la señal se lleva a lo largo de la bacteria por medio de fosfoseñalización, en última instancia, la inducción de un cambio de comportamiento, para correr o para dar vueltas (Fig. 23).

En una solución neutra, el comportamiento de *E. coli* se asemeja a un paseo aleatorio 3D que consiste en patrones de comportamiento periódico de correr y caer. Cuando sus flagelos, estructuras-hélice semi-rígidas, giran en sentido contrario, el llamado 'modus ejecutor' se activa. Entonces los flagelos giran de manera organizada, proporcionando así a la bacteria con un potente motor de torsión que puede durar hasta unos pocos segundos (Berg, 2000). Durante el breve modo de volteo, que dura en promedio alrededor de 0,1 segundos, los flagelos giran en el sentido de las agujas del reloj, causa que la bacteria se mueva de forma errática, aleatoriamente se reorienta sobre una media de 60 ° desde su dirección original (Lengeler y Postma, 1999). [5]

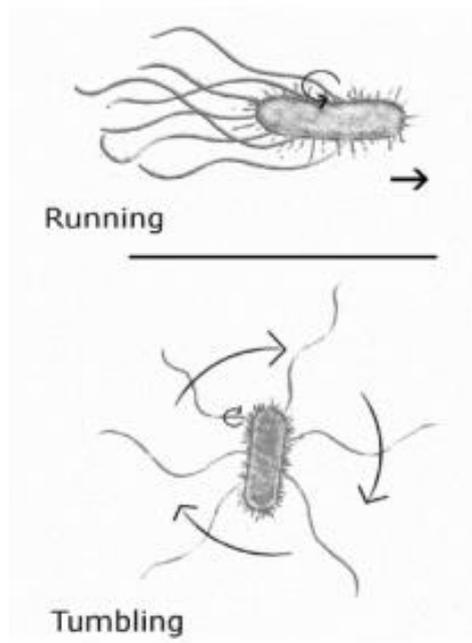


Figura 23. Comportamiento de correr y de volteo en *E. Coli* (dibujo de Daan Franken).

Cuando un gradiente químico de atrayentes está presente en la solución en la que se dispersan las bacterias, se involucran en una estrategia de escalada para lograr en última instancia, la migración neta positiva hacia el atrayente. Mediante la alteración de la frecuencia del comportamiento de volteo, el paseo aleatorio 3D de la bacteria se convierte sesgado de tal manera que dirige constantemente hacia un ambiente químico óptimo (Berg, 2000) Cuando la bacteria detecta una mayor concentración de atrayentes, las frecuencias que caen disminuyen, resultando en más largas carreras consecutivas hacia un atrayente o lejos de un repelente. En contraste, cuando se enfrentan a una menor concentración de atrayentes, o una concentración más alta de repelentes, sus frecuencias que caen aumentan, por lo que es más probable que se mueva en otra dirección.

## **Sistema de transducción de señales de dos componentes (TCST)**

El sistema TCST, o el sistema de transducción de señales de dos componentes (TCST) es un mecanismo sensoriomotor molecular que también actúa como una forma molecular de memoria necesaria para la quimiotaxis (Bourret, Charon, Stock y West, 2002). El sistema TCST se compone de dos “ramas” o vías de señalización separadas pero que interactúan: uno mediando la percepción, la vía de fosfotransferasa o vía de percepción, y dos mediando la adaptación al proporcionar retroalimentación sobre los receptores de la bacteria, o vía de metilación.

La dinámica de la vía de ritmo rápido de percepción, que opera en cuestión de milisegundos, y los de la vía de metilación más lento, que funciona en el nivel de segundo, incluso hasta minutos, dan lugar a ciclos de retroalimentación intrincados entre las dos vías (Falke, Bass, Butler, Chervitz y Danielson 1997; Lengeler y Postma, 1999). Debido a la interacción de ambas vías en diferentes escalas de tiempo, el nivel de metilación de los receptores es comparable al nivel de atractor y la ocupación repelente en los receptores (Berg, 2000). En primer lugar, vamos a centrarnos en algunos de los complejos de proteínas y sus interacciones, que están implicados en la transducción de señales del sistema TCST en *E. coli* antes de que nos dirijamos a algunos de los principios dinámicos que rigen el funcionamiento de este sistema sensoriomotor.

La configuración general de un sistema de TCST consiste en (1) los receptores, (2) un transmisor, la de proteína histidina quinasa (CheA) y un regulador de la respuesta, la proteína aspartato quinasa (CheY). Este último regula la dirección de los flagelos (Koretke, Lupas, Warren, Rosenberg y Brown 2000; Lengeler y Postma, 1999). La vía de fosfotransferasa es impulsado por la fosforilación de los residuos de histidina y de aspartato por el ATP: CheA (histidina quinasa) actúa como fosfo-donante y CheY (regulador de la respuesta) funciona como fosfo-receptor (Figura 3). Los altos niveles de quimiorrepelentes en los receptores bacterianas causan CheA, la proteína histidina quinasa, para auto-fosforilación, creando un fosfatoderivado de la proteína CheA (CheA-P), que posteriormente conducen a la fosforilación del regulador de respuesta (CheY-P) y la enzima de metilación CheB-P (Fig. 24). Al fosforalizarse, el regulador de respuesta (CheY-P) es capaz de unirse con la proteína flagelar interruptor, lo que aumenta la probabilidad de que el flagelo conmute su rotación, la inducción de comportamiento de volteo. CheY-P a menudo se dice que actúa como una “señal de volterero” dentro de la bacteria, ya que regula el movimiento de frecuencia global de rotación (Boyd y Simon, 1982; Armitage, 1999). Mientras que en condiciones normales la concentración CheY-P se mantiene en un nivel tal que se producen alternancias al azar entre el funcionamiento y el comportamiento de volteo, altos niveles de atrayentes en los receptores causan una caída significativa en los niveles CheY-P. Esto hace que los quimiorreceptores a ser menos activos, posteriormente conducen a reducir las frecuencias que caen y prolongan comportamiento natatorio (Manson, Armitage, Hoch y Macnab 1998).

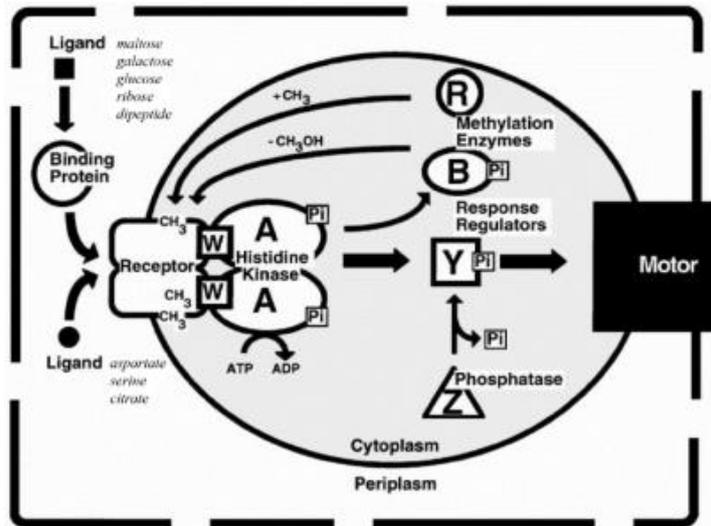


Figura 24. Representación esquemática de los complejos de proteínas y sus interacciones en el sistema TCST de la bacteria *Escherichia coli* (tomado de Falke, Bass, Butler, Chervitz y Danielson 1997, con el permiso del autor).

La segunda vía en el sistema TCST, la vía de metilación, regula la adaptación de los receptores de *E. coli*. La concentración de grupos metilo en los receptores proporciona a la bacteria información sobre las condiciones ambientales previas: Cuando los niveles de metilación en los lugares receptores son altos, refleja que las concentraciones eran muy atrayentes hace unos segundos (Armitage, 1992). Cuando los receptores están ocupados por atrayentes, la proteína CheR “metila” a los receptores, provocando el “recuerdo” del estado del lugar receptor; A continuación, CheB-P, una metilesterasa, elimina los grupos metilo restantes de los receptores (Figura 3). El proceso de metilación / desmetilación neutraliza los receptores, y los restablece a su configuración nula (Armitage, 1999). El proceso continuo de metilación y desmetilación de los receptores subyace en la sensibilidad de la bacteria a la concentración relativa de los compuestos químicos, y también le permite permanecer en un ambiente óptimo una vez que ha llegado allí por volver a los valores predeterminados de desplazamiento y volteado (Boyd & Simon, 1982).

El sistema TCST también puede ser interpretado como un sistema de regulación de detección / respuesta de la señal que procesa entradas ambientales y de realimentación interna para lograr una perfecta adaptación. Como Tyson, Chen y Novak (2003) remarca en su discusión de la modelización matemática de la dinámica de estas relaciones señalización celular / respuesta:

*Al complementar el elemento de respuesta lineal simple con una segunda vía de señalización, podemos crear un mecanismo de respuesta que exhibe una perfecta adaptación a la señal. Perfecta adaptación significa que aunque la vía de señalización exhibe una respuesta transitoria a los cambios en intensidad de la señal, su respuesta de estado estacionario R es independiente de S. Tal comportamiento es típico de los sistemas de quimiotáticos, que responden a un cambio brusco en atrayentes o repelentes, pero entonces se adapta a un nivel*

*constante de las señales. Nuestro propio sentido del olfato funciona de esta manera. (p. 223).*

En otros términos, la retroalimentación transitoria que se sustenta por la vía de metilación de ritmo lento proporciona a la *E. coli* de una forma dinámica, de memoria molecular que le permite llevar a cabo lo que se ha denominado como “un control de retroalimentación integral robusto”. Es decir, mediante la filtración de las variaciones de ruido internos y externos, y la mejora de pequeñas variaciones en la poblada densidad de receptores, la salida del sistema se vuelve independiente del nivel de entrada en estado estacionario, lo que permite una perfecta adaptación a un estímulo (Yi, Huang, Simon & Doyle, 2000). Esta capacidad de memoria molecular la hemos estudiado anteriormente en tanto que hay una semiótica molecular que permite la filtración de señales frente al ruido de los entornos, y que permiten la toma de decisiones. Algo que apuntamos como fundamento “proto-cognitivo” para cualquier célula, sea procariota o eucariota, sea individual o colectiva, sea independiente o conforma un estrato jerárquico de organismos biológicos complejos o metazoos.

### **Cognición mínima como coordinación sensoriomotora**

¿Cómo ayuda la discusión del comportamiento quimiotáctico de *E. coli* para hacer un caso claro en relación con las formas mínimas de la cognición? El contexto de esta pregunta fue el trabajo de Moreno y colegas que establecen la cognición claramente en el contexto de las organizaciones vivas, como argumentó Maturana y Varela, pero que también afirmaban que el dominio cognitivo debe distinguirse como un caso especial del dominio biológico general. En su opinión, la cognición surge cuando los sistemas trascienden de las meras funciones dependientes del metabolismo. Para ello, dicen, se requiere de un sistema nervioso, lo que proporciona un subsistema sensoriomotor estructuralmente autónomo que se puede utilizar para iniciar y guiar conductas sensoriomotoras desacopladas de procesos metabólicos. Pensamos que nuestro ejemplo *E. coli* ayuda a mejorar esta consideración biológica de dos maneras importantes.

En primer lugar, se presenta un caso potente en contra de la idea intuitivamente atractiva que los sistemas nerviosos son necesarios para la cognición, y que los sistemas nerviosos deben de servir como punto de partida adecuado para una teoría sobre la cognición (por ejemplo, di Primio, Müller y Lengeler 2000; Lengeler, Muller y di Primio 2000; Lyon, 2006a). La mejor razón para hacer un fuerte vínculo entre el sistema nervioso y la cognición es que parece tan obviamente cierto. Todas las criaturas que son, obviamente, cognitivas, tales como seres humanos o simios tienen cerebros grandes y por lo tanto la conexión parece lógica. ¿Por qué el sistema nervioso? Las características del tejido son un candidato poco probable que esto echaría materia al cerebro como una especie de sustancia mágica que marcaría la diferencia. Un candidato mucho más probable sería el desempeño de una función en particular por el sistema nervioso, pero entonces uno tendría que especificar esta función, y argumentan que tal función no puede ser realizada por otras organizaciones estructurales, tales como un sistema de TCST bacteriana.

En segundo lugar, el ejemplo sugiere un punto de partida más básico, más general y conceptualmente más claro para una cognición mínima: la coordinación sensoriomotriz. Nosotros argumentamos que el comportamiento sensoriomotor es intrínsecamente diferente de los procesos metabólicos y por lo tanto un punto de partida muy adecuado para una consideración sólida de la cognición mínima. En lo que sigue, primero desarrollar y debatir estas dos mejoras de una consideración biológica de la cognición mínima. Posteriormente, vamos a esbozar un vínculo con la cognición, y argumentar que nuestra manera de modelar la cognición cae muy bien dentro de este paradigma; dando terreno al creciente consenso de que el núcleo de la cognición gira en torno al acoplamiento sensoriomotor.

### **De la adaptación metabólica a la cognición mínima**

Las primeras formas de adaptación ontogenética en organismos unicelulares, probablemente, se regían por reacciones metabólicas<sup>303</sup>. La evolución de los mecanismos sensoriales moleculares, tales como proteínas configurables de la membrana acoplados a los procesos que se ajustan rápidamente y regulan la expresión génica y el metabolismo, permitió que los organismos se adapten mejor a las condiciones ambientales que cambian rápidamente (Bonner, 2000). Estos sistemas de señales de regulación pueden haber consistido en parte de la acción local de genes reguladores que son sensibles a las características ambientales muy específicas. A lo largo del curso de la evolución, las formas más complejas de estos sistemas de control de regulación jerárquicos aparecieron, permitiendo a los genes reguladores ejercer un control cada vez más global sobre las funciones metabólicas, de este modo se han hecho sensibles a las características fisiológicas y externas más generales (Lengeler, 2000).

Un ejemplo de tal forma básica de la adaptación metabólica se puede encontrar en el sistema “lac operón”, que regula el metabolismo de la lactosa en *E. coli*. Este grupo de genes está normalmente latente, porque la bacteria metaboliza predominantemente glucosa. Sin embargo, cuando la bacteria detecta que los niveles de glucosa son muy bajos y la lactosa es abundante en el medio ambiente, el sistema se convierte en lac operón desinhibido, permitiendo posteriormente la transcripción y expresión de genes que permiten el metabolismo de la lactosa.<sup>304</sup> Esta forma de adaptación metabólica es inducida por las condiciones ambientales, pero sigue siendo una parte de la organización metabólica del organismo. Los estafadores consisten en un proceso de un cambio en el conjunto de reacciones químicas que en conjunto constituyen el metabolismo de la bacteria. La quimiotaxis, por otro lado es un tipo diferente de

---

<sup>303</sup> Aquí “metabolismo” se interpreta como la suma de procesos que continuamente mantiene funcionalmente íntegra a la célula.

<sup>304</sup> Hay una referencia de estudios de psicología cognitiva donde se ha utilizado en laboratorio el desarrollo explicativo del funcionamiento del “lac operon” con el objetivo de descubrir el proceso cognitivo que involucra la comprensión de la actividad del “lac operon” y lo que involucra los conceptos científicos que permitieron el descubrimiento, sin entrar en el modo en cómo Monod y Jacob lo desarrollaron. Dumber, K. (1989) *Scientific reasoning strategies in a simulated molecular genetics environment*. En: 11th Annual Conference The Cognitive Science Society. August 16-19, 1989. University of Michigan Ann Arbor, Michigan. Cognitive Science Society. Psychology Press. Taylor & Francis Group. pp. 426-433.

proceso, pues no está constituida por las reacciones químicas, sino por cambios físicos en la posición de la bacteria con respecto a su medio ambiente. En otras palabras, el medio ambiente se manipula a un nivel más grande, física para que los procesos metabólicos, y por lo tanto la bacteria, se benefician del cambio, pero esta manipulación del medio ambiente-avanzar hacia una fuente de alimento, por ejemplo - es en sí misma no es parte del metabolismo. Con respecto al metabolismo, la quimiotaxis es un segundo proceso de orden, que es relevante para el cambio de oportunidades metabólicas, y de esta manera ampliar las oportunidades de adaptación de los organismos a un grado considerable. En nuestra opinión, la quimiotaxis es un buen ejemplo de cómo coordinaciones sensoriomotoras expanden formas metabólicas de adaptación, la forma en que están estrechamente relacionados con este último y, al mismo tiempo intrínsecamente diferente. Procesos quimiotácticos, o más generalmente coordinaciones sensoriomotoras, también proporcionan un buen punto de partida para la cognición. Lo que ocurre aquí en bacterias es un tipo de proceso que se puede ampliar en formas cada vez más complejas en los organismos más grandes, como nosotros mismos, mientras que todo el resto del tiempo un claro caso de coordinaciones sensoriomotoras. Si bien los procesos metabólicos particulares implican reacciones químicas, coordinaciones sensoriomotoras juegan en una escala más grande y requieren una forma de realización física particular de un organismo, ya sea una bacteria o un mono. Para las bacterias, esto viene en la forma de receptores químicos específicos, tales como proteínas de metilo-aceptar y actuadores, tales como flagelos o pili que permiten a la bacteria para moverse (Berg, 2000). Además, hemos visto que también hay, en *E. coli*, y muchas otras bacterias un sistema TCST que actúa como una conexión interior entre la memoria y los sensores y efectores de una manera que es funcionalmente similar al sistema nervioso en los animales multicelulares. TCST sistemas probablemente evolucionaron mediante la integración de preexistentes vías de señalización que fueron originalmente metabolismo relacionado, pero más tarde se desarrolló para servir a estos otros fines (Alexandre y Zhulin, 2001; Bourret et al. 2002). El uso de estas vías para la función sensoriomotora fue el comienzo de una organización estructural dedicada a reaccionar a la dispersión ambiental de los requerimientos metabólicos, en lugar de estos mismos requisitos.

Determinar formas biológicas de la coordinación sensorio-motriz como la forma mínima de la cognición proporciona un punto de partida claro y transparente para pensar sobre la cognición. Por supuesto, hay una enorme brecha entre el sistema TCST bacteriana y la reflexión humana, pero también hay una concordancia clara. Ambos pueden ser descritos en términos de percepción, la memoria y la acción, y ambos tienen su base organizativa de alguna forma de coordinación sensoriomotora. Además, en el caso de bacterias se encuentran los ingredientes básicos que se han expandido en la historia de la evolución, y por esta razón se proporciona un caso mínimo plausible de la cognición. Análogo a Dobzhansky, Maturana podría haber dicho que nada en biología tiene sentido excepto a la luz de metabolismo o la autopoiesis. En nuestra opinión, el metabolismo y la cognición en continúan intrínsecamente conectados incluso cuando son claramente diferentes tipos de procesos. El metabolismo se basa en la química,

mientras que la cognición se basa en la coordinación sensorio-motriz, que modula las condiciones de los procesos metabólicos. Esta manera de captar la cognición mínima congenia muy bien con la noción de cognición que ahora se está desarrollando dentro del dominio actual de la cognición.

### **Aspectos de la cognición mínima**

El paradigma dominante en las ciencias cognitivas cada vez más asume niveles más elementales para la cognición (Brooks, 1999; Clark, 1997; Keijzer, 2001; O'Regan y Noë, 2001). Los modelos de IA aplicados a la cognición han generado nuevos caminos de estudio hacia lo que se denomina la conducta adaptativa. Al menos en el nivel de la cognición mínima, es evidente que un conocimiento profundo del comportamiento bacteriano formado exclusivamente en términos computacionales sería incompleto. Las características de la forma de realización de la bacteria *E. coli* pueden enseñarnos acerca de las condiciones biológicas de la cognición mínima. Por ejemplo, la forma de varilla de *E. coli* disminuye el impacto del movimiento browniano de modo que menos de la aleatorización en la orientación se produce, optimizando así el comportamiento de la quimiotaxis (Dusenbery, 1996). Otra característica incorporada como se puede encontrar en la ubicación espacial de los receptores bacterianos: *E. coli* posee una compleja interacción de receptores agrupados en sus polos. Recientemente se ha sugerido que esto contribuye a una respuesta más uniforme de los motores flagelares, que se encuentran a diferentes distancias de los receptores (Sourjik, 2004). Además de las características incorporadas, las complejidades de la conducta cognitiva mínima son igualmente dependientes de la interacción dinámica del conocedor mínimo con su entorno. La quimiotaxis es un buen ejemplo de la conducta cognitiva mínima que sólo puede ser plenamente entendida como un fenómeno “situado” o extendido con el medio ambiente. Es decir, los patrones de comportamiento inherentes de *E. coli* interactúan con gradientes o estructuras en el medio ambiente. La “*Situacionalidad*” (“*Situatedness*”)<sup>305</sup> es algo más que una condición previa para la conducta cognitiva mínima. Mientras que las condiciones previas tales como la viscosidad proporcionan una base estable para la ocurrencia de los procesos cognitivos propios, la interacción sensoriomotoras del organismo mínimo cognoscente es constitutiva del propio proceso cognitivo. Tales espacios de interacción son específicos de la especie, ya que dependen de la forma de realización del organismo en cuestión. Como dijo von Uexküll (1937) “Cada animal está rodeado de cosas diferentes, el perro se rodean por cosas de perros y la libélula se rodean por cosas de libélula. Cada Umwelt tiene su propias dimensiones espaciales y temporales”. Desde esta perspectiva, la cognición mínima no es tanto una propiedad centralizada del hardware biológico de un organismo, o un conjunto de algoritmos calculados internamente, sino que denota una abstracción de la reciprocidad entre el organismo y el entorno perceptible por el propio organismo. Esta reciprocidad es dinámica en el que no tiene sentido si se considera en un único punto en el tiempo. No hasta que uno considera el desarrollo de la conducta con el tiempo hacer las diferencias entre la actividad rápida vía de señalización del fosfo-relé y la respuesta más

---

<sup>305</sup> van Duijin, M (2011) Op.Cit. p. 60

lenta de la vía de metilación / desmetilación; la retroalimentación transitoria que es inducida por la vía de metilación opera en una escala de tiempo mucho más lento, en el intervalo de segundos a minutos, en comparación con la vía de la percepción, que opera en el nivel de milisegundos. Por lo tanto, por lo menos en el nivel de la cognición mínima, parece que la forma de realización, la situacionalidad y la dinámica están en igualdad de condiciones en el establecimiento de la conducta cognitiva.

### **Implicaciones**

Nuestra interpretación de la cognición mínima (1) se opone a la interpretación antropocéntrica común de la cognición, así como la dicotomía general induce entre cognoscentes inteligentes y organismos aparentemente mecanicistas meramente capaces de conducta instintivo-reflejos. Además, (2) que se extiende el alcance del concepto de cognición para incluir conductas sensoriomotoras básicas, que también apoya y fundamenta el desarrollo de ideas actuales en la ciencia cognitiva que hacen hincapié en los aspectos dinámicos, situados y consagrados de la cognición (por ejemplo, Brooks, 1999; Clark, 1997; O'Regan, y Noë, 2001). Elaboramos en cada una de estas implicaciones.

#### **El antropocentrismo y la dicotomía entre la cognición y los instintos-reflejos<sup>306</sup>**

Hemos hablado de cómo la bacteria *E. coli* es capaz de atravesar los gradientes de productos químicos atrayentes o repelentes en su entorno. Este comportamiento implica que muchos de los componentes que necesita para calificar las definiciones tradicionales de la cognición, es decir, la percepción, la memoria y la acción. De hecho, esta conducta, desde la perspectiva de un observador (Brooks 1991a) podría incluso ser descrita como la toma de decisiones: para correr o para voltear (Jonker, Snoep, Treur, Westerhoff, y Wijngaards, 2001). Sin embargo, el propósito de nuestro estudio no es el de proponer que las bacterias pueden enmarcarse como auténticos cognoscentes (mínimos) en el sentido antropocéntrico tradicional del término; Obviamente, la quimiotaxis bacteriana está en un estadio muy básico y en un largo recorrido de los seres humanos que tienen que decidir ir a un mexicano o un restaurante chino, aunque millones de bacterias del intestino están divertidas tomando esa decisión por nosotros (sobre todo para no caer enfermos). En lugar de ello, queremos hacer hincapié en que la cognición mínima y las ventajas evolutivas que presta sólo pueden ser mal interpretadas desde una perspectiva antropocéntrica, como hemos recalado en los aspectos históricos de la biología cognitiva, en donde todos los investigadores de protozoos, aun de acuerdo de un carácter “psíquico”-cognitivo de la conducta de sus “muchachos”, han estado en absoluto desacuerdo de un carácter antropomórfico de las conductas adaptativas. Desde

---

<sup>306</sup> Una alternativa al enfoque antropocéntrico es el llamado enfoque biogénico a la cognición (Lyon 2006a). Este enfoque trata de anclar el concepto de la cognición misma en la biología. En este enfoque, la cognición es, en primer lugar una forma de adaptación biológica que confiere ciertas ventajas selectivas específicas para los organismos por lo que les permite hacer frente a la complejidad ambiental (Godfrey-Smith, 2002a). Desde este punto de vista bottom-up, es importante especificar estas ventajas adaptativas, para ser más específico acerca de las demandas estructurales y mecanismos funcionales de la cognición, para distinguir el conocimiento de la vida misma, y para distinguirla de otras formas de adaptación biológica, como la adaptación genética. (van Duijn 2011, pp. 17-18)

nuestro punto de vista, la cuestión no es si la conducta bacteriana, o la de los mixomicetos, con los que hemos consagrado nuestro estudio detallado, implica la toma de decisiones genuina, o si ésta y otras capacidades de manera similar antropomorfas se limitó a utilizar instrumentalmente para interpretar el comportamiento bacteriano de una actitud intencional. En su lugar, preferimos hacer preguntas sobre la evolución de la cognición y de sus condiciones de contorno biológicos. La pregunta por la evolución de la cognición mínima fue probablemente en primer lugar en relación al metabolismo: todos estos organismos tuvieron que enfrentarse con el problema general de la optimización de las condiciones para la defensa de su metabolismo. Tenemos la sospecha de que este problema fundamental radica en el origen de muchas, si no todas, las formas básicas de la cognición, y que es crucial para entender las soluciones de la naturaleza para comprender finalmente la complejidad de la cognición superior. Reservando el término de la cognición para las habilidades de resolución de problemas típicamente humanos, como los que participan en el dilema del restaurante, y menospreciar un comportamiento más simple como mecanicista, reflexiva o de cableados no hace justicia a la complejidad de la cognición incluso del más simple de los organismos. Mientras que las explicaciones antropocéntricas a la cognición tienden a centrarse en las divergencias entre “hombre y el resto de los seres vivos” pensamos que hay mucho más de superposición de lo que generalmente se reconoce.

### **Cognición mínima como coordinación sensoriomotora**

Si la cognición está fundamentada en procesos sensoriomotores como sospechamos, esto implica que el estudio de la cognición en otros organismos debe aspirar a una mejor comprensión de la dinámica de las coordinaciones sensoriomotoras relativamente simples. Mutatis mutandis podemos hablar de las capacidades típicamente humanas, tales como el razonamiento de problemas que explícita la resolución o la simbolización. A este respecto, el comportamiento de la bacteria *E. coli* nos enseña algunas lecciones valiosas. Destacamos tres aspectos de la conducta de la quimiotaxis: la conducta se incorpora, es dinámico y se sitúa. El comportamiento se encarna o se incorpora, en el sentido de que está totalmente determinado por las propiedades específicas del cuerpo de la bacteria, lo que nos pueden enseñar acerca de las condiciones biológicas de la cognición mínima: el flagelo de *E. coli* aumenta su eficiencia para llevar a cabo la conducta de quimiotaxis. La diferencia en la escala de tiempo de las dos vías es crucial en la generación de quimiotaxis: las retroalimentaciones transitorias inducido por la vía de metilación de la bacteria *E. coli* opera en una escala de tiempo mucho más lento en comparación con su ritmo rápido vía de percepción. La cognición mínima en general y nuestro estudio de caso, en particular, pueden proporcionar modelos simples para las ideas que actualmente circulan en la ciencia cognitiva (Port y van Gelder 1995<sup>307</sup>; Thelen y Smith 1994<sup>308</sup>). Todas estas ideas suscriben a la opinión general de que la cognición no se centra en cálculos internos, sino que es la acción situada es clave en la

---

<sup>307</sup> Port, R., & van Gelder, T. J. (1995). *Mind as Motion: Explorations in the Dynamics of Cognition*. Cambridge MA: MIT Press.

<sup>308</sup> Thelen, E., Smith, L. (1994). *A Dynamic Systems Approach to the Development of Cognition and Action*. Cambridge, MA.: MIT press.

cognición. Nuestra revisión de la quimiotaxis de la *E. coli*, así como la de los mixomicetos que veremos más adelante, explica y fundamenta algunas de estas ideas en el trabajo empírico sólido, y muestra que hay mucho más cognición que el razonamiento humano. Tomando coordinaciones sensoriomotrices como punto de partida para la cognición es compatible con una perspectiva biogénica (Lyon, 2006a) sobre la evolución de la cognición, aunque también lo es a través de una perspectiva de la conducta adaptativa enactiva (Barandarian, Di Paolo, Rödhe 2009; Egbert, Barandarian y Di Paolo 2010; Di Paolo 2010). Por otra parte, con base en nuestra interpretación de cognición mínima, la evolución de la cognición puede ser vista como un proceso de diferenciación progresiva y de expansión de las capacidades de coordinación sensoriomotora (Keijzer, 2001). En nuestra opinión, los principios sensoriomotrices que subyacen en cerebros y sistemas nerviosos tienen sus raíces en los mismos principios sensoriomotrices que se pueden encontrar en las bacterias, como en los mixomicetos.

Uno de los enfoques de investigación de este trabajo está en constatar que el nivel de aprendizaje de los organismos sin sistema nervioso, en determinados momentos, superan las barreras de los tropismos y las taxias, desarrollado a través de las tomas de decisiones. Hemos visto en capítulos anteriores que dichas tomas de decisiones se ofrecen en los niveles moleculares, y fundamentan el constructo funcional de la emergencia de la complejidad cognitiva. De este modo confeccionamos una condición epistemológica del concepto de proceso cognitivo y de inteligencia desde la biosemiótica. Ahora que hemos visto alguno de los ejemplos en la historia de la biología que avalan la actual pregunta sobre la cognición en los organismos sin sistema nervioso, debemos preguntarnos primero sobre el concepto de cognición en sí en la actualidad; así como el de inteligencia, para poder proseguir con el desarrollo de una biología que acepte la condición de posibilidad de la cognición en los organismos sin sistema nervioso. Esta podría ser la biología cognitiva.

## **Biología Cognitiva y los Principios Mínimos Cognitivos**

La cognición es, ante todo un fenómeno biológico natural – independientemente de la producción que ofrezca la inteligencia artificial. Como tal, es coherente abordar la cognición del mismo modo que cualquier otro fenómeno biológico. Esto comporta asumir – como dice Pamela Lyon – un grado significativo de la continuidad entre diferentes tipos de organismos – cada vez más corroborado por la biología comparativa, en especial la genómica – estudiando modelos de sistemas más simples, como microbios, protistas, etc., para comprender los principios básicos que modelan los procesos cognitivos más complejos como de los primates o los humanos.

Con el concepto de biología cognitiva se desarrolla una visión más profunda de una fenomenología de la vida, donde el fundamento de éste carácter teórico lo podemos entrever de la evolución y el desarrollo de los organismos reside en la proposición VII del capítulo III de la *Ética de Spinoza: El esfuerzo con que cada cosa intenta perseverar*

*en su ser no es nada distinto (lo cual es idéntico) de la esencia actual de la cosa misma.*<sup>309</sup>

Entonces ¿tiene algo que ver la perseverancia en su ser de Spinoza con la supervivencia del más adaptado de Herbert Spencer<sup>310</sup>? ¿O con la selección natural en Darwin? ¿Dicho “esfuerzo” en la perseverancia en su ser está relacionada con la cognición?

Un individuo vivo – comenta Jorge Wagensberg<sup>311</sup> – tiende a perseverar su ser cuando la incertidumbre de su entorno arrecia. Esta afirmación es una comprobación de la biología experimental de la capacidad de los organismos para integrar en su agencialidad compleja las capacidades de sobrevivir, de reaccionar ante una hostilidad o de un alimento del entorno auto-decodificable (Umwelt) tanto de forma reactiva como posiblemente auto-inductiva. Como hemos visto anteriormente, el hambre es el principal fundamento cognitivo para la supervivencia.

Aquí avanzo la plausibilidad de una actividad *auto-inducida* que requiere de una explicación tanto biológica como biosemiótica y que defiende en este trabajo. Es decir, la supervivencia del individuo emerge en los umbrales de stress o de tensiones entre Umwelt e Innenwelt (mundo interno, pero a partir de ahora referido al agente). Las condiciones del entorno decodificable por un organismo sencillo como una ameba o un mixomiceto, ofrece al conjunto del agente unos parámetros de referencia que van directamente a los circuitos funcionales (sistemas complejos de transducciones de señales, activación de ribosomas, transcripciones del ADN al ARN mensajero, activación del centro organizador de los microtúbulos, activación de la actina-miosina, etc.). Pero entonces el organismo ha de reaccionar de forma coherente ante el balance de parámetros que fundamentan la descripción (muy posiblemente sin representación) de dicho Umwelt.

Comprendemos que en organismos jerárquicamente más complejos que han adquirido sistema nervioso obtienen una representación del entorno decodificable en función de los circuitos funcionales jerárquicamente complejos (desde las activaciones celulares de

---

<sup>309</sup> Spinoza, B. (1677) *Ethica more geometrico demonstrata*. En castellano: *Ética*. Traducción Vidal Peña. Alianza Editorial, 1996. p.182. El texto escogido es en realidad del libro de Jorge Wagensberg (2011) *Raíces Triviales de lo Fundamental*. Tusquets Metatemas, 112. pp. 156.

<sup>310</sup>El concepto original es “*Survival of the fittest*”. He considerado más adecuado la traducción de “fittest” por “adaptado” que palabra “apto” que, aparte de que se traduce también por “suitable”, ofrece connotaciones discriminatorias, así como selecciones entre individuos en vez de especies. Spencer, H. (1864) *Principles of Biology*. New York, D. Appleton and Company. Vol. 1, p. 444 dice textualmente: “This survival of the fittest, which I have here sought to express in mechanical terms, is that which Mr. Darwin has called 'natural selection', or the preservation of favoured races in the struggle for life”. Más tarde, Darwin describe en una carta a A. R Wallace el 5 de julio de 1866: “*I fully agree with all that you say on the advantages of H. Spencer's excellent expression of "the survival of the fittest. This however had not occurred to me till reading your letter. It is, however, a great objection to this term that it cannot be used as a substantive governing a verb; and that this is a real objection I infer from H. Spencer continually using the words natural selection"*. Ya en la quinta edición de *On Origin of Species* publicada el 10 de febrero de 1869, aparece en el capítulo 4, pág. 72: “*This preservation of favourable individual differences and variations, and the destruction of those which are injurious, I have called Natural Selection, or the Survival of the Fittest*”.

<sup>311</sup>Wagensberg, J. (2011) Op. Cit. pp. 156 y ss.

los parámetros organulares hasta la activación del sistema nervioso central, periférico o el que reine en el organismo). La capacidad de toma de decisiones se hace más patente y por tanto la gestión de la respuesta auto-inducida es más evidente en la observación etológica. Pero en organismos sin sistema nervioso tanto procariotas unicelulares como eucariotas unicelulares (amebas, paramecios, algunos mixomicetos y otros protistas) como pluricelulares (otros mixomicetos o por como también el reino vegetal) la biología actual ha estado muy reacia a ofrecer esa auto-inducción observable en los organismos con sistema nervioso. Esto puede ser debido a la que es factible observar un feedback de respuesta multi-trópicas (galvanotropismo, quimiotropismo, heliotropismo, hidrotropismo, tigmotropismos, etc.) del enjambre de enjambres celulares que comportan los órganos tanto de un cetáceo como de un mamífero. El sumatorio de tropismos de cada órgano (intestinal, pulmonar, ocular, dérmico, etc.) llegan al cerebro y ofrece respuesta a la representaciones perceptivas, así como de las estimulaciones multisensoriales (exterocepciones, interocepciones, cenestesias, etc.) que ofrecen una integración sensorial compleja. Entonces el cerebro del ser vivo con toda esta integración multisensorial compleja ofrecida por el sumatorio de cientos de miles de *Funktionkreises* multiagenciales – si se me permite describir la fisiología nerviosa desde una semántica uexkülliana<sup>312</sup> –discierne, calcula y ofrece una o varias respuestas coherentes, en función del desarrollo de sus facultades como individuo y de sus potenciales tanto fenotípicos como genotípicos.

Ahora bien, a la acción de cazar de un guepardo a una gacela, qué descripción etológica obtenemos... la misma que un moho mucilaginoso como el *Physarum polycephalum* ante una bacteria... o la de un gato frente a un ratón... depredador-presa. Ahora bien, la actividad del guepardo o la del ratón ¿es o no es una reacción ante un multitropismo interactivo? La acción de cazar del guepardo no es una reacción ante los múltiples estímulos (externos e internos) que le ofrece percibir a una gacela, o la acción de supervivencia del ratón ¿no es una reacción ante el peligro ofrecido por la hermenéutica – o la interpretación de las señales – de los circuitos funcionales de los órganos receptores del roedor ante la presencia en su Umwelt del gato?

Todo tiene respuesta eficiente ante la evidencia de una finalidad interna del ser vivo: sobrevivir; es decir perseverar en su ser como individuo, o si es necesario, como especie. No entro en este instante en la diferencia entre la individuación organizativa (o “*enkapsis*” según el término de Herman Dooyeweerd<sup>313</sup>) y la individuación ontológica.

---

<sup>312</sup> Propongo dicha terminología de Uexküll para ofrecer un punto de vista del circuito nervioso como un círculo funcional donde el feedback “receptor – afecto – efector” describe un funcionamiento cibernético donde emerge una significación de señales/signos en la que el profesor Søren Brier, del Departamento Internacional de Estudios de la Cultura y la Comunicación de la Copenhagen Business School, describe como “cibersemiótica”, o cibernética de segundo orden: “*Although Uexküll actually used some cybernetic conceptualization in his idea of the functional circle, he is, with this far-reaching bio-phenomenological constructivism, going way beyond Lorenz’ ethological conceptions and into the area of modern autopoietic thinking*”. Brier, S. (2001) *Cybersemiotics and Umweltlehre*. Semiotica. Vol. 134 (1/4). pp 779-814.

<sup>313</sup> Concepto de Dooyeweerd de estructura de la individualidad, especialmente en lo que calificó de una modalidad que lleva, nos permite pensar del mármol y la estatua como dos cosas distintas, pero necesariamente o estrechamente vinculada por *enkapsis*. Dooyeweerd no utiliza los términos "estructura

El caso es que ese “esfuerzo” del que habla Spinoza en la mencionada proposición VII es un esfuerzo biológicamente parametrizable. En este trabajo no voy a realizar una diatriba entre “esfuerzo”, “voluntad” y “libre albedrío”. Pero si lo voy a realizar entre “esfuerzo” y “auto-inducción” como causa eficiente de la supervivencia y ante ella, la capacidad de decodificar, transducir, discernir señales para tomar decisiones de acciones y de reacciones. Es otras palabras vamos a profundizar sobre la cognición y sus principios mínimos capaces de hacer que un organismo sencillo como una ameba o nuestros amigos mixomicetos tomen decisiones. Veamos si tienen algo más que una conducta adaptativa reactiva y podemos hablar de una conducta adaptativa inteligente.

### **El concepto de biología cognitiva , la pregunta por la cognición, y sus fundamentos pre-bióticos**

La biología cognitiva es una ciencia emergente que considera natural de la cognición como una función biológica (Lyon y Keijzer 2007: 133). Ésta se basa en el supuesto teórico de que cada organismo – ya sea una sola célula o sea pluricelular – está continuamente involucrado en actos sistemáticos de la cognición, junto con conductas intencionales, es decir, con un acoplamiento sensorial–motor (van Duijn, Keijzer y Franken 2006).

Es decir, si un organismo puede detectar estímulos de su entorno y responder en consecuencia, diríamos que es cognitivo. Cualquier explicación de cómo la cognición natural puede manifestarse en un organismo se ve limitada por las condiciones biológicas en el que la especie sobrevive evolucionando (Lyon y Opie 2007).

Como vemos, aquí comenzamos a desarrollar una cuestión fundamental sobre el concepto de cognición. No voy a desarrollar un despliegue sobre los fundamentos del concepto de cognición muy completo, puesto que la pregunta por la cognición en si excedería por completo los objetivos de este trabajo, pero si que quiero enfocar el desarrollo del concepto en tanto que podemos hablar de cognición en sistemas complejos artificiales, robótica e IA en general, pero a la hora de marcar la referencia biológica hay como un salto al vacío cuando se trata de exponer con rigor la condición de posibilidad de cognición en los organismos sin sistema nervioso.

De hecho, los estudios sobre la cognición ha estado principalmente relacionado con los animales superiores, la etología cognitiva ya a mediados del siglo XX fundamenta los comportamientos de los animales como procesos cognitivos fundamentados en los órganos sensoriales que permiten la percatación del entorno y su desarrollo para la supervivencia del individuo y de su especie, desde el reflejo condicionado de Pavlov hasta la etología kantiana de Konrad Lorenz., la etología avícola de Nikolaas Tinbergen y la etología apícola Karl R. von Frisch. Desde la teoría darwiniana de las especies cada

---

de la individualidad" o "enkapsis "hasta algún tiempo después de 1930. Se refiere previamente a una «unidad de sujeto "[subjectseenheid]. Incluso en 1930, todavía se refiere sólo a un Ver Marcel Verburg , (1989) *Herman Dooyeweerd. Leven en werk van een Nederlands christen-wijsgeer*, (Baarn: Ten Have), pp.112, 126. Friesen, J.G. (2005) Individuality Structures and Enkapsis: Individuation from Totality in Dooyeweerd and German Idealism. <http://www.members.shaw.ca/hermandoooyeweerd/Enkapsis.html>

organismo está evolucionando de una raíz común. Esto es muy importante como fundamento de una raíz común de los principios mínimos cognitivos fundadores de los desarrollos emergentes superiores. Por eso se requieren tres elementos adicionales en la epistemología de la biología cognitiva: (i) el estudio de la cognición en una especie de organismo es útil, a través del contraste y la comparación, para el estudio de las capacidades cognitivas de otra especie<sup>314</sup>; (ii) para proceder con sistemas cognitivos más complejos es útil partir de los organismos más sencillos<sup>315</sup>, y (iii) Para una mejor comprensión de la naturaleza de la cognición, mayor ha de ser el número y la variedad de las especies estudiadas en este sentido.<sup>316</sup>

Mientras que la ciencia cognitiva se esfuerza por explicar el pensamiento humano y la mente consciente, el trabajo de la biología cognitiva se centra en el proceso más fundamental de la cognición de cualquier organismo.

El concepto de “biología cognitiva” aparece por primera vez en 1978 en un artículo de que publicó Brian Carey Goodwin (1931 –2009) sobre el punto de vista cognitivo de los procesos biológicos<sup>317</sup>. De hecho Goodwin afirmó que a través del estudio de la formación de patrones biológicos, las reglas formales han comenzado a emerger en el pensamiento biológico. Esto posibilita la comprensión de la generación de las estructuras que representan formas biológicas características como las extremidades, los ojos, o las hojas de las plantas. Estas reglas son fenomenológicas, proporcionando un enfoque estructuralista, no reduccionista, para el problema del formulario biológico. Este enfoque se desarrolló en relación con una visión cognitiva de los procesos biológicos en las que se observan a los organismos como sistemas que operan sobre una base de conocimiento<sup>318</sup>. Este conocimiento se expresa en forma de normas (normatividad) o limitaciones (constricciones) que generan comportamientos útiles para el organismo o de la especie por la supervivencia, reproducción y evolución.

Goodwin (1978) comenta que los organismos, definidos como sistemas cognitivos (debido al uso de aquellos conocimientos adquiribles) se caracterizan por procesos generativos que implican tanto la restricción, la innovación y las propiedades que se toman para definir el comportamiento creativo. Tanto el desarrollo como en la evolución se entienden entonces como aspectos de un proceso creativo. Tal concepto de devenir creativo es fundamental para una filosofía del organismo, como advirtió Whitehead, pero es problemático para una filosofía de la sustancia como la de

---

<sup>314</sup> Ver Spetch M. L., Friedman, A. (2006) *Comparative cognition of object recognition*. Comparative Cognition & Behavior Reviews. Vol. 1, pp. 12-35.

<sup>315</sup> Baluška, F. Mancuso, S. (2009). *Deep evolutionary origins of neurobiology: Turning the essence of 'neural' upside-down*. Communicative & Integrative Biology. Vol. 2, Nº 1, pp. 60–65.

<sup>316</sup> Lyon, Pamela (2013a). *Foundations for a Cognitive Biology*. Published on the homepage of the Cognitive Biology Project at the University of Adelaide.

<sup>317</sup> Goodwin, B. C. (1978) *A cognitive view of biological process*. Journal of Social and Biological Structures, Vol 1 (2). pp. 117–125.

<sup>318</sup> Goodwin define el conocimiento como una descripción útil de algún aspecto del mundo (Umwelt), ofreciendo al poseedor de la competencia de comportarse de una manera que contribuya a su supervivencia y reproducción (Goodwin, 1976a) *Analytical Physiology of Cells and Developing Organisms*. London: Academic Press.

Descartes. Se argumenta que los aspectos duales y positivistas de la ciencia contemporánea, que se derivan de la filosofía substancial, son perjudiciales para la comprensión de los procesos biológicos, y que un punto de vista cognitivo es útil para conceptualizar los problemas biológicos en términos de procesos creativos.

Para defender este enfoque cognitivo de los procesos biológicos, Goodwin se fundamenta tanto en la filosofía organicista de Whitehead como en los procesos de organización de las formas de D'Arcy Wentworth Thomsom. Es decir, que la evo-devo de los organismos comprende una matemática de las formas, una topología natural, que siendo esencialmente física, desarrolla una creatividad y un orden organicista que no puede estar desvinculado de una evo-devo cognitiva de los organismos. Aún discriminando la creatividad natural de la mental, Goodwin argumenta que ambas son más afines que lo que actualmente el pensamiento científico permite.

Esta forma de pensar está muy afín también con la semiofísica topológica de René Thom, cuando argumenta de que el desarrollo morfogénético de los organismos y su capacidad inmediata de establecer estabilidades estructurales requieren de una óptica topológica vitalista – o como lo dice literalmente Thom un “vitalismo geométrico” –<sup>319</sup>, en tanto que se establece procesos teleonómicos internos de adquisición de formas y estructuras que permitan el equilibrio inestable de la vida en su interacción con el entorno y su reconocimiento del Umwelt característico, a parte de ser una estructura global que rige los detalles locales.

Basándose en una comparativa con los argumentos de Chomsky respecto a la capacidad de generar una sintaxis correcta de forma instintiva<sup>320</sup>, Goodwin asevera que la posesión de normas o constricciones estructurales (anatómicas) y funcionales (fisiológicas) que conforman la incorporación de dichas normatividades son equivalentes ala posesión del conocimiento requerido para decir correctamente oraciones. Son ambos conocimientos innatos inherentes del fenotipo humano.

Simplemente he utilizado esta proposición en una forma más extendida para sugerir que el atributo básico de los organismos vivos, es la posesión de los conocimientos sobre los aspectos del mundo, el conocimiento que los hace competente para sobrevivir y reproducirse en el medio ambiente al que están adaptadas o que ellos conocen.

Goodwin define el conocimiento como una útil descripción de algún aspecto del mundo, dando al poseedor de la competencia a comportarse de una manera que contribuye a su supervivencia y su reproducción (Goodwin, 1976a). El hecho de que se trate de

---

<sup>319</sup> Thom, R. (1977) *Stabilité structurelle et morphogénèse*. Inter Éditions S. A. Paris. En castellano *Estabilidad estructural y morfogénesis*. 1997 Editorial Gedisa, Barcelona. p. 170. Thom jamás fue un vitalista en el sentido metafísico que se le ha dado – dañina y prejuiciosamente – al desarrollo de las mecanismos vivos; como también se hizo con la filosofía del organismo de Hans Driesch. Aunque este comentario excede de las pretensiones de esta investigación, quiero dejar claro que el debate para la recuperación del carácter vital de la vida – y por tanto de la fenomenología biológica en tanto que parte de la biología teórica – queda abierto para una posterior discusión. Nota del autor.

<sup>320</sup> Chomsky denominó gramática generativa al conjunto de reglas innatas que permite traducir combinaciones de ideas a combinaciones de un código. Chomsky, N. (1972) *Problems of Knowledge and Freedom*. Fontana Ed. London.

descripciones significa que hay códigos o conjuntos de códigos que son relacionados con aquellos que son descritos. El desenlace de tales códigos, que es el equivalente de aprender a leer un idioma desconocido, junto con la solución del problema de cómo el conocimiento se transmite confiablemente de generación en generación, ha sido una preocupación importante de la biología contemporánea: el conocimiento codificado se encuentra en gran parte en el ADN, que actúa como un almacén de memoria primario para el organismo, este conocimiento, siendo en forma de hipótesis que necesitan ser traducido en forma activa para la prueba. Sin embargo, hay una gran cantidad de conocimiento 'tácito' en otras estructuras. La elucidación de la traducción y el proceso de montaje de las secuencias codificadas en el ADN lineales a proteínas activas tridimensionales que funcionan como pruebas de hipótesis genéticas mediante la revelación de su '*significado*', constituye uno de los posibles triunfos de la biología del siglo XX.

Goodwin utiliza el término '*significado*' en relación anteriormente con la traducción y prueba de hipótesis genéticas y necesita alguna aclaración en este contexto. En forma codificada como ocurre en el ADN, la información para una proteína particular, tal como la enzima  $\beta$ -galactosidasa (necesaria para el catabolismo de la lactosa de nutrientes en microorganismos) o para la cristalina (una proteína que forma la lente transparente de la ojo) no puede ser examinada ya que no ejerce ninguna acción sobre el organismo o su entorno. Antes de que pueda ser examinada, la información en el ADN debe traducirse en una forma en la que ejerza un tipo particular de fuerza y actúe dentro de un contexto particular. Así, la  $\beta$ -galactosidasa convierte la lactosa en glucosa y en galactosa cuando se opera en el contexto de la célula bacteriana (que define las condiciones particulares de pH, concentración osmótica, nivel de sustrato, etc.), mientras que la cristalina transmite rayos de luz de una manera particular en el contexto del ojo. Estas actividades Goodwin asevera que constituyen las *pruebas de significación* de las hipótesis codificadas en el material hereditario, que *implican la interpretación de la información*. Esta interpretación se lleva a cabo dentro de un contexto particular, que en parte determina el patrón de las fuerzas que actúan durante la operación de prueba. A continuación, Goodwin pretende llegar a una distinción entre información y conocimiento. La definición técnica de la información implica únicamente la selección (por ejemplo, una especificación de un conjunto de posibilidades), pero no dice nada del significado, lo que trata de involucrar a la actividad en espacio-tiempo real. Así, el conocimiento difiere de la información en que no sólo implica la selección de posibilidades alternativas, sino que también incluye instrucciones para la acción que, operando en un contexto particular, transmite significado. Esta restricción normativa de las posibilidades es lo que confiere significación informativa a la actividad. Por lo que podemos entrever que ya hay esta normatividad de la acción en el Umwelt a nivel macromolecular.

De hecho el profesor Alexei A. Sharov, entomólogo, genetista y biosemiótico de la National Institute on Aging de Baltimore comenta que la información ha de ser considerada como un microestado de un sistema que influye en la elección de unos

sistemas de trayectorias hacia puntos de bifurcación<sup>321</sup>. El sentido (sense) de la información – asevera Sharov – tiene dos componentes: un significado o propósito (meaning) y un valor o importancia (value) El sentido es una colección de prohibiciones y limitaciones para la información sobre las trayectorias de un sistema de desarrollo y de conductas; y el valor es medido por la contribución de información hacia la seguridad del automantenimiento y la autoreproducción del sistema. Significado y valor son considerados como el nivel material e ideal. El sentido de la evolución se caracteriza por su extensión abierta en el espacio-tiempo y por la complicación de su estructura. Su sistema va gradualmente del sistema pre-biológico hacia el hombre.

El profesor Ladislav Kováč del departamento de bioquímica y de genética de la facultad de ciencias naturales de la Universidad Comenius en Bratislava, y exministro de educación de la República Eslovenia, ha sido un firme defensor del progreso científico en la actividad epistemológica, sobretudo en el estudio comparativo y funcional de la genómica de orgánulos eucariontes, como también de la investigación interdisciplinar entre las ciencias y las humanidades. Pero también ha sido uno de los fundadores de la biología cognitiva. Kováč afirma que:

*“La biología cognitiva apunta a una síntesis de los datos de diversas disciplinas científicas en un marco único de concebir la vida como epistémico despliegue del universo (el principio epistémico). De acuerdo con la epistemología evolutiva, considera la evolución biológica como un proceso progresivo de acumulación de conocimientos. El conocimiento se manifiesta en las construcciones de los organismos, y la complejidad estructural de las construcciones que llevan el conocimiento incorporado corresponde a su complejidad epistemológica. En contraste con la epistemología evolutiva, la biología cognitiva se basa en el supuesto de que el nivel molecular es fundamental para la cognición y se adhiere a un principio de complejidad mínima, que establece que la forma más eficiente para el estudio de cualquier rasgo de la vida es mediante el estudio de ella en el más simple nivel en el que se produce”<sup>322</sup>.*

*“la biología cognitiva es más una reinterpretación de los datos existentes que un programa de investigación que ofrecen nuevos enfoques experimentales para viejos problemas”*

De hecho Kováč apunta a un desarrollo cognitivo a nivel molecular, algo parecido a Goodwin en tanto su ubicación de la cognición en el comportamiento orientado de las enzimas. De hecho más adelante expondremos que la biosemiótica de primer nivel (o de nivel molecular) robustece las ideas pre-cognitivas de macromoléculas y ofrece un cierto fundamento a una explicación de la adaptación inteligente en arquitectura como

---

<sup>321</sup> Sharov, Alexei. A., (1991) Biosemiotics: A functional-evolutionary approach to the analysis of the sense of information, in T. A. Sebeok and J. Umiker-Sebeok (eds.), Biosemiotics: The Semiotic Web 1991, Mouton de Gruyter, Berlin, pp. 345-374.

<sup>322</sup>Kováč, L. (2000) *Fundamental principles of cognitive biology*. Evolution and Cognition Vol.6. pp. 51-69.

las construcciones con tensegridad funcional por parte de los microtúbulos citoplasmáticos, así como de la distribución de la actina-miosina para la mejor funcionalidad contráctil para la motilidad celular.

La biología cognitiva es, entonces, un nuevo enfoque de los paradigmas biológicos sobre la cognición que necesitan de una contextualización significativa coherente, tanto a los datos experimentales como a un desarrollo semántico de la biología. Es decir, una biohermenéutica que conecte informaciones de diferentes estudios y permita programas de investigación transdisciplinarios que provoquen nuevos problemas abiertos entre las ciencias biológicas. Pero estos problemas en las ciencias biológicas repercuten en las ciencias humanas hacia un método de estudio sistémico de la complejidad, un “biohumanismo”<sup>323</sup>. Dicho método integra nuevas reformulaciones de los sistemas vivos, de los procesos cognitivos y de los sistemas inteligentes.

*“Un sistema es vivo cuando [este] se mantiene por sí mismo gracias a una red de regeneración de procesos que tienen lugar dentro de los límites de su propia creación, y que tiene una la interacción cognitiva de adaptación con el medio. “*  
(Luisi, P. L., Damiano, L., 2010, Gayon, J., 2010).

Por sistemas inteligentes se entiende el comportamiento adaptativo resolutivo en el contexto de los sistemas complejos en los que implican interacción y retroalimentación. Un sujeto que actúa como sistema inteligente se dedica con éxito y de forma productiva a responder de una forma global a los mecanismos de su medio ambiente. Esto se percibe como parte de un todo, la influencia del todo sobre sí mismo, así como su propia influencia sobre el conjunto. Mediante la observación de su propia interdependencia, es capaz de actuar con resolución (Hämäläinen, R., Saarinen, E., 2004).

Por eso el interés por una nueva reformulación del concepto de proceso cognitivo y de inteligencia requiere una comprensión más profunda de la conducta de los sistemas vivos, en donde la cognición no depende de la existencia de un sistema nervioso que lo canalice, sino de circuitos funcionales que permiten la percepción mínima del medio envolvente y de su procesamiento biosemiótico in vivo.

Pamela Christine Lyon de la University of Adelaide en Australia sostiene que la cognición es un fenómeno biológico natural de máximo acceso, al igual que otros fenómenos biológicos naturales: mediante el estudio de los sistemas de modelo simple (como las bacterias, los mixomicetos) se puede comprender las bases para luego ir ampliando a ejemplos más complejos (desde las abejas y las hormigas hasta los homínidos).

---

<sup>323</sup> Biohumanidades o biohumanismo es una perspectiva de la relación entre las humanidades (filosofía y sobre todo la historia de la ciencia), la biología y la sociedad. En esta visión, no sólo las humanidades comentan sobre el significado o las implicaciones de los conocimientos biológicos, sino que incrementan nuestra comprensión de la propia biología. (Stotz y Griffiths 2008, p. 37)

Como hemos visto anteriormente, Lyon desenvuelve una biocognición –si se me permite el término expresado por Marc van Duijin (2011) – desde un marco biogénico, cuyo enfoque trata de anclar el concepto de la cognición misma en la biología. En este enfoque, la cognición es, en primer lugar una forma de adaptación biológica que confiere ciertas ventajas selectivas específicas para los organismos por lo que les permite hacer frente a la complejidad ambiental. En palabras de Godfrey-Smith (2002a):

*“La función de la cognición es la que permite que el agente haga frente a la complejidad ambiental.<sup>324</sup> (...) Entiendo la cognición como un conjunto de capacidades que, en combinación, permiten a los organismos lograr cierto tipo de coordinación entre sus acciones y el mundo. Esta colección incluye típicamente las capacidades de la percepción, la representación interna del mundo, la memoria, el aprendizaje, la toma de decisiones y en la producción de la conducta. Este conjunto de capacidades que, según la Tesis del Entorno Complejo, tiene la función de hacer posibles patrones de comportamiento que permiten a los organismos hacer frente de manera efectiva con los modelos y las condiciones complejas en sus entornos.”*

Pamela Lyon (2006a) sintetiza en diez principios biogénicos el desarrollo que Kováč (2000) realizó fundamentando los principios de la biología cognitiva. En esta síntesis se ilustran la profundidad las bases con las que se han establecido en la escuela de biología cognitiva de Adelaide y que quedan enumerados de la siguiente forma:

1. *Continuidad:* Las capacidades cognitivas complejas han evolucionado de las formas más simples de la cognición. Hay una línea continua de descendencia significativa. (No descartar la aparición de nuevas capacidades con mayor complejidad).
2. *Control:* La cognición directa o indirectamente modula los procesos físico-químicos que constituyen un organismo.
3. *Interacción:* La cognición facilita el establecimiento de las relaciones recíprocas de causalidad con las características del medio ambiente, dando lugar a intercambios de materia y energía que son esenciales para la persistencia continua del organismo, el bienestar o la reproducción.
4. *Normatividad:* La cognición se refiere a la evaluación (más o menos) continua del sistema de necesidades relativas a las circunstancias imperantes, el potencial de interacción, y si la interacción actual está funcionando o no.
5. *Memoria:* La cognición requiere la capacidad de retener información durante un período de tiempo mayor que cero.
6. *Selectividad:* Debido a que un organismo es capaz de interactuar provechosamente con algunos, pero no todas, las propiedades del medio

---

<sup>324</sup> Fundamento de “The Environmental Complexity Thesis” (ECT). Godfrey-Smith (2002a)

ambiente, la cognición implica la diferenciación de algunos estados de los asuntos de otros estados de cosas.

7. *Valencia*: En relación con las necesidades del organismo y / o experiencia diferentes propiedades del medio ambiente se invertirá con diferentes grados de fuerza o importancia, tanto positivos como negativos.

8. *Anticipación*: La cognición es intrínsecamente orientada hacia el futuro (¿qué pasa después?) y por lo tanto predictivo.

9. *Reducción de la aleatoriedad*: La cognición es un mecanismo importante que los sistemas biológicos reducen y modulan la influencia de las perturbaciones aleatorias sobre su funcionamiento y, por consiguiente, son resistentes a las perturbaciones.

10. *Interdependencia*: Las vías bioquímicas que inervan la cognición están íntimamente ligados a los de otras funciones biológicas, lo que hace difícil la delimitación y en gran medida una función de objetivos explicativos. (El mapa no es el territorio).

Con la esperanza de estimular el interés de los microbiólogos en esta área, actualmente Lyon (2015) ha hecho una revisión sobre la evidencia contemporánea de la cognición en eubacterias en las zonas centrales de la investigación cognitiva: transmisión de señales, valencia, la comunicación, la coordinación sensorio-motriz, la memoria, el aprendizaje, la anticipación y toma de decisiones sensorial en un entorno complejo y el cambio de circunstancias. Lyon muestra que existen paralelismos no sólo a nivel heurístico de una analogía funcional, sino también a nivel de mecanismo molecular, evolución y ecología, que es donde se podría encontrar un intercambio fructífero de ideas entre disciplinas.

Pone como ejemplo el análisis de los genomas de bacterias, que revelan una y otra vez serina / treonina quinasa en procariotas, en particular en aquellas que viven en entornos cambiantes y que muestran un comportamiento social complejo, como mixobacterias, *Bacillus subtilis*, y *Paenibacillus vórtice*. El calcio / calmodulina quinasa dependiente II (CaMKII) es una serina / treonina quinasa crítica para la formación de la memoria en los seres humanos. Es un claro ejemplo de equivalencia homeomórfica aún no investigado en estos momentos.

Luisa Damiano y Pier Luigi Luisi (2010) en “Towards an Autopoietic Redefinition of Life” lo definen de esta manera:

*“Un sistema vivo es un sistema capaz de auto-producción y auto-mantenimiento-a través de una red de procesos de regeneración que tiene lugar dentro de un límite de su propia creación y se regenera a través de interacciones cognitivas o de adaptación con el medio”.*

Para encontrar los procesos mínimos de cognición en la biología cognitiva debemos tener en cuenta la producción y procesamiento de señales de comunicación para el

comportamiento del grupo y de los tipos de interconexión entre las unidades simples individuales (células).

Müller, di Primio y Lengeler (2001) determinan como *principios mínimos de cognición* a:

- Vías modificables de estímulo-respuesta [base de todos los comportamientos]
- Búsqueda selectiva
- Percepción
- Memoria
- Formación de expectativas de reacción [sobre la privación repentina de alimentos]
- La detección de la identidad
- Escrutinio [en búsqueda selectiva]
- Adaptación
- Habitación
- Aprendizaje
- Cooperación
- Reconfigurabilidad del cuerpo [sintetizando una situación-dependiente o la autodestrucción de efectores y sensores; para evitar hambre]
- Flexibilidad [tensegridad]

Las habilidades cognitivas mínimas se derivan las propiedades que se puede definir por una adecuada abstracción de los procesos bioquímicos subyacentes en biología celular. Por eso la reinterpretación de los datos existentes nos ofrece un aspecto biosemiótico del cognitismo que emerge en una “biohermeneutica” coherente con las diferentes revisiones transdisciplinares que cada grupo de investigación puede reconocer en concordancia con sus especialidades. De este modo se enriquecen las mismas sin que dichas interpretaciones perturben contradictoriamente el sentido de las investigaciones especializadas de cada disciplina implicada.

Abrirnos un puente hacia la comunicación intersubjetiva construida a través del cognitismo elaborado por Thomas Nagel de cara a la pregunta de *cómo ser un organismo, siendo dicho organismo*.

### **La aportación de Gregory Bateson a la biología cognitiva**

La visión del mundo de Bateson es científica y, hasta cierto punto materialista, pero no clásicamente mecanicista, porque depende de Norbert Wiener, uno de los fundadores de la cibernética, que desarrolló los conceptos de control circular (retroalimentación) y el comportamiento dirigido a un objetivo y enlazó la teoría de la información a la interpretación probabilística de la entropía en termodinámica desarrollada por Boltzmann y Gibbs, que es la figura principal de la Wiener (véase 1988/1954 p. 8-12).

Bateson ve que la materia y la energía están impregnadas de procesos circulares de información de las diferencias, lo que crean “*pautas que conectan*”. Profundamente

interesado en la antropología, la biología y la psicología, se acerca a los campos de la información, la cognición y la comunicación desde una perspectiva cibernética.

“La hipótesis de trabajo” de Bateson es que los componentes básicos del mundo son el espacio, el tiempo, las partículas elementales (la materia), la energía y las diferencias - y por lo tanto las relaciones de información. Él cree que la ciencia se acabará si dotamos a las partículas elementales con cualidades mentales (Bateson 1980:103). Su proyecto es explicar la mente en función de la complejidad y organización cibernética en la forma en que concibió la cibernética (véase más adelante).

Bateson cree que la fuerza de la cibernética radica en su capacidad para proporcionar una comprensión más profunda de lo que es lo mental, mediante la incorporación de su concepto de la información en una filosofía universal cibernética. Bateson cree que su cibernética puede proporcionar una comprensión de la mente que no es ni subjetiva ni idealista, ni materialista, ni tampoco mecanicista.

En mi opinión, hay dos razones por las que Bateson no tuvo sucesores: (1) No fue capaz de liberar a su concepto de información de la de Norbert Wiener. Aunque la definición de Bateson de la información parece estar bien adaptada a la cibernética de segundo orden, pues apuntaló la definición del concepto de negentropía, lo que da a su teoría un sabor fisicalista. (2) Tampoco desarrolló una teoría satisfactoria cibernética del observador. Es por ello que consideramos necesario compararlo con visión semiótica de Peirce, porque se ocupa de los problemas de la mente y el significado de una manera completamente diferente, pero con la misma ambición transdisciplinaria. Pero su solución, cuando se desarrollan en su totalidad, es tan diferente y original que es probable que asuste a la mayoría de los científicos, incluso a muchos biosemióticos peirceanos.

1. El mapa no es el territorio. La información no es la energía. Creatura no es Pleroma.
2. Es el patrón que conecta los elementos en el mundo biológico y mental.
3. La unidad mínima de proceso mental es un circuito de retroalimentación negativa.
4. Hay una jerarquía de tipos lógicos en el mundo fenoménico.
5. La evolución es una forma de la mente y la mente es una forma de evolución.

Vamos a estudiar con detenimiento los seis criterios que integran los procesos cognitivos, o como lo denomina Bateson los procesos mentales.

1. ***Una mente es un agregado de partes o componentes interactuantes.*** Es idéntico al concepto de red autopoietica que es una red de componentes interactuantes.

De esta forma, Bateson afirma que existe un umbral de irreductibilidad partes-todo en el proceso cognitivo. Es decir, que ha de haber una condición necesaria y suficiente de componentes integrales en un sistema complejo para que pueda emerger la cognición. Por lo que según Bateson no existe cognición atómica, de acuerdo a la indiferencialidad de cada individualidad atómica. Por lo que la cognición tiene un determinado grado de complejidad, y a su vez una característica de irreductibilidad, lo que como proceso

significativo es plausible una identificación atómica (semánticamente) o no divisible sin que pierda la característica significativa de cognición. Estudiaremos más adelante si la cognición, como proceso es emergente o no. Empero Bateson afirmó que el proceso cognitivo es inmanente a la interacción de sus “partes” diferenciadas, no querría adelantarme ahora si dicha afirmación es una condición necesaria, aunque no suficiente para determinar la cognición como una emergencia.

**2. *La interacción de las partes de la mente se desencadena por la diferencia,*** y la diferencia es un fenómeno no sustancial que no se encuentran en el espacio ni el tiempo, la diferencia está relacionada con la negentropía y la entropía más que con la energía.

Es decir, ha de haber una detección de diferencias para instanciar los componentes materiales que integran el proceso cognitivo. Por lo que dicha detección de diferencias es para Bateson una definición de lo que es la información: “*diferencias que establecen una diferencia*” (ibid. p. 111). Ahora bien, existe un umbral mínimo de gradiente perceptivo y/o receptivo como también sensitivo. Las diferencias efectivas son ítems de información.

Según Bateson, “toda recepción de información es necesariamente una recepción de noticias de diferencia, y toda percepción de diferencia queda limitada por un umbral. (...) Resulta difícil discriminar entre un cambio lento y un estado. Hay por fuerza un umbral de gradiente por el cual el gradiente no puede ser percibido” (ibid. p. 111).

Pero, ¿cual es la naturaleza de la información para Bateson?

Mientras que la causa de un suceso o accidente<sup>325</sup> es cierto impacto o instancia ejercida sobre una parte del sistema material o substancia por alguna otra parte<sup>326</sup> - una parte actúa sobre otra parte, sea entre partes, o una determinada parte en un momento 1 y la misma parte en un momento 2 – para activar un tercer componente: el “receptor”. Dicho receptor (o sea un órgano sensorial final) responde a una diferencia o a un cambio, siempre que este cambio sea detectable por encima del umbral de percepción. Por lo tanto, podemos describir el umbral mínimo de gradiente como un límite de “reducción de la estructura funcional”<sup>327</sup>.

Cibernéticos como Soren Brier (2008) explican que la información para Bateson parece estar bien adaptada a la cibernética de segundo orden por estar ligada a la negentropía siguiendo a Nobert Wiener, y por lo tanto aparece como fisicalista en este sentido. Pero la identificación de la información como “receptor de notas de diferencia” ofrece un

---

<sup>325</sup> Tomamos la terminología de Jaegwon Kim de “accidente” y “substancia” para los términos de “suceso” y “sistema material” de Bateson respectivamente. De esta manera podremos relacionarlos posteriormente en el análisis de las condiciones de posibilidad de una causación ascendente para la interacción de las partes hacia los procesos cognitivos y el tipo de superveniencia que se ofrece.

<sup>326</sup> Un concepto necesario de “relación”.

<sup>327</sup> El concepto de reducción de la estructura funcional de Jaegwon Kim es una alternativa al modelo tradicional de Ernst Nagel. que requiere de una vinculación *a priori* de los hechos en la explicación básica de la reducción de los fenómenos (Kim 1998).

problema hasta ahora no resuelto. La diferencia es no substancial pues no se encuentra en el espacio ni en el tiempo. En este punto se desliga del concepto estadístico de la entropía de Shannon, aunque la información sea también sinónima de neguentropía, habiendo tomado de Wiener la termodinámica de Boltzman y de Gibbs para ligarlo con los circuitos de retroalimentación (feedback).

Podríamos entender que nos interesase el problema de la transferencia de información desde una perspectiva de la ingeniería, si lo que interesa es el proceso de transmisión por encima del de identificación semántica del mensaje codificado, como desarrolló Shannon<sup>328</sup>. En el caso de los organismos vivos, aún en los más simples, la transducción de señales no acaba con la recepción de las mismas. Se trata también de la decodificación, su transcripción y su significación interactiva para procesar el mensaje adecuadamente a la naturaleza interna de las partes que activan procesos básicos (metabólicos, motiles, etc.). La semántica de las señales (y, en general, el lenguaje) se rige por el enriquecimiento (Werner 2010 y Vedral 2010). El significado enriquece el contenido de la información de una señal.

Cuando una célula, por ejemplo, recibe una señal a través de un receptor se inicia una serie de pasos en una red interna de interpretación, lo que puede llevar un factor de transcripción para activar una zona de su genoma. Esto a su vez puede activar una red de genoma completo. Por lo tanto, el significado de una señal depende de la interpretación compleja llevada a cabo por la célula receptora. El contenido de la señal de información se ve reforzado por medio de un mapeo de interpretación. La misma señal puede ser sencilla y, por sí sola, de pobre información.

Según comenta el físico Vlatko Vedral, en la adición de información, se permite respuestas muy sofisticadas a través de sencillas señales. Por lo que la información contenida en un mensaje intercelular no está contenida en la señal, en la probabilidad de la señal de ser enviada, o su valor sorpresa para el receptor. Por lo tanto, la teoría de Shannon es casi irrelevante a la información y la comunicación en la comprensión del desarrollo procesos. Argumenta Vedral que el significado de un mensaje está determinado por cómo afecta a la información y estado intencional del agente. Los agentes coordinan sus acciones mediante el uso de la comunicación para ajustar sus respectivas estrategias para que se cohesionen y así lograr sus objetivos de enclavamiento (Werner 1989). Pero esto tiene poco que ver con la probabilidad de una señal. Por lo que la teoría de Shannon no dice nada sobre el significado y la comprensión del lenguaje.

---

<sup>328</sup> La teoría de la comunicación de Shannon es la base para explicar la cooperación social, la información biológica, y la economía. Una de las cosas más frustrantes sobre la teoría de Shannon es que la gente sigue tratando de hacerle llevar una carga demasiado pesada, una carga Shannon nunca tuvo la intención. Eso puede ser debido al uso de la etiqueta de "información." El poder de su teoría radica en su total desconocimiento del significado, de este modo ignora la esencia de la información y de la comunicación social y biológica (Werner 2010). De hecho una de las tesis de Vedral es que el proceso de creación de información biológica no proviene de ninguna información biológica anterior. Este es una cuestión de creación *ex nihilo*. La selección natural no nos dice que la información biológica proviene de - sólo nos da un marco de cómo se propaga (Vedral 2010, p. 56).

Como Andrey Kolmogorov da a entender, la complejidad de una cadena no puede ser mayor que el programa mínimo que lo genera y lo detiene. Podemos resumir esto en un principio de conservación complejo que se aplica a todos los eventos espacio-tiempo generados por los agentes con significados estratégicos e información del estado (Werner 1996). Pero como dice Bateson la información consiste en diferencias que establecen una diferencia. ¿Y como se establece la detección de una diferencia en un panorama pleromático<sup>329</sup>? Para ello necesito tomar prestado la concepción de “saliencia” y de “pregnancia” de la topología diferencial del matemático René Thom (1990).

Las formas salientes son todas las formas experimentadas que se separan netamente de un fondo continuo del cual aquella forma destaca. Thom lo resume de esta manera, de modo que en toda percepción de fenómenos, la primera experiencia es la de la discontinuidad. La experimentación de un cambio en el espacio continuo a la que posibilita una singularidad, es la experimentación de una “saliencia”. Dicha experimentación puede darse por sonidos (el tintineo de una campana y la aparición de un ruido en medio de un silencio) o visualmente (la aparición de un fenómeno que modifica el espacio “substrato”). Pero También las “saliencias” pueden darse en cambios de gradientes de temperatura, o la presencia de un componente químico diferente al substrato base, o incidencia de fotones en un espacio carente de luz. En general, una forma saliente tendrá un interior dentro del campo de percepción; en consecuencia esa forma presentará una frontera, un contorno aparente.

Ahora bien, las formas salientes que tienen impacto en el aparato preceptor del ser vivo, siendo de efecto transitorio y de corta duración. Cosa distinta ocurre con ciertas formas que tienen en el ser vivo una significación biológica (las formas de presa para el depredador, las sexuales, etc.) Dichas formas se llamarán “pregnantes” y su carácter específico “pregnancias”.

Para Thom no puede haber suficiente información en el código genético para ofrecer una programación de las formas fuentes de las pregnancias. Es necesario apelar en ella la transmisión cultural, vinculada con la organización social o familiar de la colectividad.

Resumiendo, las saliencias son formas individuadas en un espacio (euclidiano o no). Las pregnancias son acciones propagativas emitidas por las formas salientes a las que las que las pregnancias catectizan, y esa catectia provocan en el estado de tales formas transformaciones llamadas efectos figurativos. Son pulsiones de energía neguentrópica, que excitan al organismo, permitiendo entoces la orientación perceptiva y sensitiva.

---

<sup>329</sup> El concepto de “pleroma” de Bateson viene a ser equivalente al mundo físico no viviente, donde las fuerzas y los choques suministran una clase de explicación suficiente. Contrapuesto al concepto de “creatura” que hace referencia al mundo físico viviente, donde es imposible entender nada a menos que se invoquen las diferencias y distinciones. Bateson recoge los conceptos de Carl Gustav Jung (siguiendo a los gnósticos), aunque la inferencia significativa – que no su significado - no es exactamente la que expone Jung. (Bateson, 1979-2006, p.17)

Como diría Uexküll, “cada organismo está bien dotado como para obtener cierta percepción del mundo exterior. Cada especie vive su propio mundo sensorial, para que otras especies puedan estar parcial o totalmente ciegas... Lo que un organismo detecta en su entorno siempre es parte de lo que está alrededor. Y esta parte es diferente según el organismo<sup>330</sup>”.

3. ***El proceso mental requiere de una energía colateral.*** En este criterio Bateson resalta la distinción entre las formas en que los organismos vivos y los sistemas no vivos interactúan con sus entornos. Al igual que Maturana, distingue entre la reacción de un objeto físico y la respuesta de un organismo biológico. Mientras que Maturana describe la respuesta de un organismo en criterios de acoplamiento estructural y patrones no lineales de organización, Bateson lo hace a través de en términos de energía. Pero lo que pone a descubierto Bateson es que para describir la energética de vida y para describir la de las fuerzas y choques de lo no viviente debería de existir una sintaxis diferenciada. De hecho se animan las fuerzas, en sucesos no vivos personalizados. A eso Bateson lo denomina la “falacia patética”. Es el caso, por ejemplo de las colisiones entre dos bolas de billar, cuando la bola A golpea a la bola B, le da energía, respondiendo B utilizando la energía que la bola A le dio. Entre las bolas no existe ningún “golpear”, ni “dar”, ni “responder” y ni un “utilizar”. Ahora bien, sólo la diferencia puede desencadenar respuesta.

La transmisión de las pregnancias mediante señales descritas por ejemplo en el reflejo condicionado de Pavlov, u otros experimentos que se han hecho con señales fotónicas a células 3T3 (el experimento de Albrecht-Buehler)<sup>331</sup> nos hace prever que la afección que se produce en la catexia<sup>332</sup> es una excitación que sirven a determinada regulación biológica (sea el ensalivado del perro en el caso de Pavlov, sea el rango de atracción a larga distancia de un colectivo de células 3T3) Dichas catexias se convierten en una primera forma de concepto, o clase de equivalencia entre formas salientes. Es curioso como Thom, al tratar de denominar concepto a las catexias, provoca una transformación de significado entre el hecho significativo de la saliencia (el tintineo de la campanilla, o la emisión de luz infrarroja dispersa) llamada catexia objetiva y las pulsiones que evocan las pregnancias (las regulaciones antes mencionadas) denominadas catexias subjetivas. Los efectos que provocan son transformaciones en sus estados internos (hambre al perro, sensación de presencia de otras células familiares), produciendo manifestaciones exteriores en su forma. Estas manifestaciones son las denominadas por Thom como efectos figurativos. Un hecho frecuente del efecto figurativo es que el hecho de que una forma catectizada vuelve a emitir la misma pregnancia catectizante. Sería el caso de una infección que, por ejemplo, contamina a sujetos sanos que a su vez puede llegar a ser contagiosos y volver a emitir la misma infección en el medio.

---

<sup>330</sup> Sebeok, T. (1996) Signos: Una introducción a la semiótica. Ed. Paidós. Barcelona. Pág. 137.

<sup>331</sup> Dispersión de luz cercana al infrarrojo.

<sup>332</sup> Catexis. Thom utiliza este concepto propio de las escuelas psicoanalíticas. Según Freud, el sujeto puede dirigir su energía pulsional hacia un objeto o una representación e impregnarlo, cargarlo o cubrirlo de parte de ella. Se llaman catexias a estas descargas de energía psíquica. A partir de la experiencia de catectización, el objeto cargado ya no le resulta indiferente al sujeto, más bien tendrá para él un halo o colorido peculiar.

También existen otros tipos de comunicaciones que no son por contagio, y que apelan a señales sonoras o luminosas de naturaleza ondulatoria, (como en el caso del colectivo de células 3T3) y que se impregnan o se afectan de perturbaciones del entorno o del colectivo.

Para estudiar la aproximación de la interactividad que un organismo tiene con el campo de percepción multisensorial del entorno que le circunda, o como lo denomina Uexküll "Umwelt" debemos ofrecer la siguiente descripción topológica que Solomon Marcus (2001) ofrece:

“El Umwelt parece ser una parte de los espacios vectoriales topológicos que describe las interacciones que tienen lugar entre los diferentes seres vivos y entre éstos y algunas otras entidades, pertenecientes al mundo inorgánico. Cualquier ser vivo interactúa con su Umwelt, pero además está involucrado en muchas otras interacciones. Diferentes vectores puede dar cuenta de ellos, pero la imagen obtenida no es completa. Tenemos que considerar dos aspectos más: el parámetro “tiempo”, porque la situación puede cambiar en cualquier momento, al igual que la capacidad iterativa del operador que asocia a cada ser vivo su Umwelt. Este operador muestra algunas similitudes con un operador contextual, que también puede ser repetido indefinidamente. Si B es un contexto de A, entonces cada parte de B, tiene a su vez, distintos contextos. Si B es el Umwelt de A, entonces cada ser vivo situado en B tiene a su vez su Umwelt. La iteración de estos operadores tiene una alta complejidad (la complejidad topológica de una forma). En lo que respecta a los textos y contextos, este comportamiento se rige por conceptos tales como intertexto y de hipertexto; la alta complejidad no parece tener, en este sentido, aspectos conflictivos. La totalidad del texto-contexto, la interacción está gobernada por una conexión de Galois<sup>333</sup> y por el comportamiento de algunos operadores de clausura<sup>334</sup> contextual. Por el contrario, la iteración de un operador Umwelt podría extenderse en una secuencia de Umwelten cuya interferencia sí genera conflictos que todavía no se había investigado con rigor”.

---

<sup>333</sup> En matemática, especialmente en la teoría del orden, una conexión de Galois es una correspondencia particular entre dos conjuntos parcialmente ordenados (abreviado "poset" en inglés). Las conexiones de Galois generalizan la correspondencia entre subgrupos y subcuerpos investigada en la teoría de Galois. Pueden ser vistas como una generalización de los isomorfismos de orden, puesto que están constituidas por dos funciones en inversa dirección, que no son inversas absolutas una de la otra, pero tienen cercana relación.

<sup>334</sup> Otro tipo especial de endofunción en un poset es el operador de clausura, que no solamente es monotónico, sino también idempotente, es decir.  $f(x) = f(f(x))$ , y extensivo, es decir.  $x \leq f(x)$ . éste tiene mucho uso en toda clase de "clausuras" que aparecen en matemática. Solomon Marcus utilizó estas herramientas matemáticas de teorías de orden aplicadas a la construcción de su teoría de Gramática Contextual Selectiva. La aplicación de su teoría a computación y en contraste con los lenguajes naturales ha ofrecido una capacidad de abstracción muy útil para la interpretación de contextos asociados tanto a las clases de señales como a las clasificaciones lingüísticas. Marcus, S. (1997) Contextual grammars and natural languages. En Rozenberg, G y Salomaa, A. "Handbook of Formal Languages: Linear modeling: background and application" pp. 215-235.

Los organismos vivos están sujetos a grandes regularidades conservadoras de la física, y Bateson era plenamente consciente que los patrones no-lineales de organización constituyen una característica fundamental de los organismos.

#### **4. *El proceso mental requiere de procesos circulares (o más complejas) de determinación.***

Los patrones no-lineales llevo a Maturana al concepto de autopoiesis; y el de causalidad –no lineal al de estructuras disipativas y procesos no reversibles de Ilya Prigogine.

Pero también confirma la necesidad de circuitos funcionales que permitan tanto el contacto del organismo con el entorno y la recepción de los elementos integradores del entorno que tienen referencia significativa en el organismo. Dicha referencia significativa tienen origen fenotípico y genotípico. Por eso es necesario comprender cómo se han ido generando los descubrimientos de dichos circuitos o, como Uexküll los denominó “círculos funcionales” o “*Funktionkreises*”. La naturaleza de los círculos funcionales son siempre la interrelación del mundo significativo del organismo “Umwelt” y el mundo interno del agente “Innenwelt”. Tanto la homeostasis, la homeoresis, los circuitos de retroalimentación, como el circuito de transferencia y recepción de información se basan en círculos. Pero en los organismos vivos dichos círculos se orientan hacia la adaptación creciente a una estabilidad generada por el “nicho ecológico” que al procesar la información característica de la circulación de señales Hoffmeyer lo denomina “nicho semiótico”. Estas y otros procesos circulares múltiples en organismos y sistemas complejos son siempre de naturaleza autocorrectiva.

El circuito autocorrectivo y sus numerosas variantes suministran posibilidades para modelar las conductas adaptativas de los organismos<sup>335</sup>. La naturaleza autocorrectiva de los círculos funcionales es gracias sobretodo a la catexia neguentrópica que impulsa al organismo a la autonomía, como generador de impulsos y a normalizar conductas adecuadas para la estabilización y la supervivencia. Este juego de balances para la supervivencia depende de la capacidad de respuesta a la sumatoria de variables que dependen el medio circundante. Dichas variables son complejas y a su vez no lineales, por lo que el sistema autopoietico opera con variables también complejas, como puede ser la estabilidad estructural dependiente de la tensegridad y de la topología celular, o los procesos de reacción-difusión para la motilidad, el flujo dinámico, y las respuestas a las taxis o tropismos.

La “estabilidad” puede lograrse ora mediante la rigidez, ora mediante la repetición continua de algún ciclo de cambios menores; ciclo que retornará a su “status quo ante” después de cualquier perturbación (ibid. p. 115). Como veremos más adelante los mixomicetos son un ejemplo perfecto de estas circunstancias de adecuación (fitness) a las variables del Umwelt. Pueden pasar de estar en un estadio esclerótico a un estadio plasmodio – o pseudoplasmodio – para poder realizar su ciclo vital de esporulación.

---

<sup>335</sup>Rosembueth, A., Wiener, N., Bigelov, J. (1943) Behavior, purpose and teleology. *Philosophy of Science*, vol. 10, pp. 18-24.

Reitero, todo circuito autocorrectivo y sus variantes ofrecen posibilidades para modelar las conductas adaptativas de los organismos. Ahora bien, la realización exitosa del circuito autocorrectivo tiene implícito un propósito, una finalidad: conseguir completar el círculo vital, que de hecho son bifurcaciones de múltiples cicloides encadenados en una danza de dependencia e independencia que en realidad consuman una interdependencia de naturaleza segmentada o estroboscópica (aparente independiente, pero íntimamente interdependiente). De ahí que siempre la ciencia – como método de percepción - depende de la capacidad de autocorrección del instrumento observador, y esto, aparte de ser un problema tecnológico, sobretodo es un problema de la objetividad constructivista en consensos intersubjetivos de los paradigmas científicos. Por eso concuerdo con Bateson de que la ciencia indaga, pero no prueba (ibid. p. 40).

***5. En el proceso mental, los efectos de la diferencia deben de ser vistos como transformaciones (es decir, versiones codificadas) de sucesos que los han precedido.***

En este criterio Bateson acepta la realidad de un mundo objetivo independiente del organismo. Pero esta realidad externa independiente luego es codificada o transformada en una realidad interior. Por lo que los procesos cognitivos comportan representaciones mentales de un mundo objetivo. De hecho, apela a una cita del padre de la semántica no-aristotélica, Alfred Korzybski: “el mapa no es el territorio”, es decir, no debemos confundir a los modelos de la realidad con la realidad misma. Pero también implica que el efecto no es la causa, o sea que las representaciones o patrones cognitivos son esquemas a posteriori. En los círculos funcionales, Uexküll describe que no es posible integrar las señales receptoras de forma significativa si el organismo no tiene en su interior un circuito que transduzca las señales representando el espectro topográfico del Umwelt llamado “contra-mundo” o “Genenwelt”. Es el Gegenwelt la resultante “espejo” generado por los circuitos internos transductores de señales “familiares” del organismo. La composición de esas señales provenientes del medio circundante, y que genera el marco de referencia de los objetos espaciales que envuelven el entorno del organismo toma cuerpo de “nicho ecológico”. La exploración de los procesos y las conductas adaptativas al medio de existencia habitual o nicho ecológico son generadas por reconocimiento normativo de sintaxis y pragmáticas comunicativas, con significado o valor semántico privado. Por lo tanto hemos de comprender que existe tanto un dominio como un recorrido<sup>336</sup> en el entorno de un agente donde se establecen biocomunicaciones entre otros agentes u organismos que comparten señales químicas, fotónicas o ondas, y cuya decodificación forma parte del circuito de retroalimentación y de supervivencia de las especies con un Umwelt total o parcialmente compartido. El

---

<sup>336</sup> El dominio de una función (matemática) lo forman el conjunto de valores que toma la variable independiente. El recorrido lo forman todos los valores de la variable dependiente que son imagen de algún elemento de la variable independiente. Este sería un equivalente homeomórfico del concepto de Umwelt y de Innenwelt, donde el Umwelt tiene su relación de equivalencia a todos los elementos del entorno, los cuales son independientes del observador. Pero cada una de las imágenes de esos elementos del entorno son dependientes del Gegenwelt del observador, formando parte del mundo interno o Innenwelt del mismo. Tendríamos también una razón de equivalencia entre el denominado *codominio* de una función y el Ausswelt o conjunto de elementos del entorno que recogen tanto los que son imagen de algún elemento de la variable independiente (el observador), como los que no lo son.

campo semántico del nicho ecológico de una especie se convierte en lo que denomina Jesper Hoffmeyer “nicho semiótico”. La creación del nicho semiótico es el espectro de posiciones que el organismo ocupa topológicamente en su esfera bio-lógica (Hoffmeyer, 1996, p. 140). Las biocomunicaciones pueden ser entre organismos u agentes de la misma especie o de especie diferentes que comparten todo o parte de la codificación informativa. Bateson lo explica con ejemplos industriales:

“En las variedades de transformación, las hay cuya respuesta es graduada de acuerdo con alguna variable del suceso desencadenante, y las hay también cuya respuesta depende de umbrales tipo “abierto-cerrado” (switch). Un ejemplo del primero sería una máquina de vapor, y un del segundo sería un termostato” (ibid. p.124).

De hecho en genética tenemos circuitos que actúan sus variedades de transformación de modo “abierto-cerrado”: las redes regulatorias genéticas es un ejemplo claro. Un represor o un activador de proteínas usados para crear operones genéticos funcionan de forma “interruptor”<sup>337</sup>

En sistemas complejos la autocorrección es gradual y cuantitativa, cuyas diferencias son indicadores informativos y a su vez cantidades de suministros necesarios. Estos suministros necesarios son en términos de Uexküll (1940) “portadores de significación” puesto que en realidad transfieren información que es útil y significativa para el agente. Un ejemplo es el fototropismo.

De acuerdo a estas presentaciones de comunicaciones entre sucesos y sus transformaciones Bateson distingue dos clases de codificación: la codificación según plantilla o molde (template coding) y la codificación ostensiva. La codificación según plantilla tiene como referente el paisaje epigenético, el desarrollo morfogenético de los organismos, y su regulación genética, por lo que está más ligada al Bauplan. En cuanto a la codificación ostensiva hace referencia a la biocomunicación por taxis (quimiotaxis, fototaxis, haptotaxis, gravitotaxis, magnetotaxis, etc.) y por lo tanto, más ligada a los círculos funcionales “*Funktionkreises*”. Ahora bien, para Jakob von Uexküll tanto el Bauplan como los círculos funcionales están ligados a una actividad teleomecánica, una teleonomía interna de causalidad formal, que denominó “la conformidad con el plan” o “*Planmässigkeit*” y que induce a la adecuación al Umwelt para la reestructuración de un equilibrio inestable, cíclico y variable, independientemente de la

---

<sup>337</sup> Un operón se define como una unidad genética funcional formada por un grupo o complejo de genes capaces de ejercer una regulación de su propia *expresión* por medio de los sustratos con los que interaccionan las proteínas codificadas por sus genes. Este complejo está formado por genes estructurales que codifican para la síntesis de proteínas (generalmente enzimas), que participan en vías metabólicas cuya expresión generalmente está regulada por otros 2 factores de control, llamados “Factor promotor” y “Operador”.

El operador permite la activación/desactivación del promotor a modo de “*interruptor génico*” (genetic switch) por medio de su interacción con un *compuesto inductor*. Y de esta manera el promotor dará lugar a la expresión/represión del resto de los genes estructurales.

La *expresión génica* es el proceso por medio del cual todos los organismos procariotas y eucariotas *transforman la información* codificada en los ácidos nucleicos en las proteínas necesarias para su desarrollo y funcionamiento.

estabilidad estructural y morfogénica del organismo. De este modo el organismo adquiere un aprendizaje ontogénico adaptativo, sin que por ello haya modificaciones genéticas de los caracteres aprendidos. Es decir, un efecto Baldwin donde se restablecen cambios en la conducta adaptativa cuyos comportamientos aprendidos pueden hacerse instintivos o inherentes en generaciones subsiguientes sin un lamarckismo, puesto que no implica la transferencia directa de habilidades aprendidas de generación en generación<sup>338</sup>.

#### **6. La descripción y clasificación de estos procesos de transformación revelan una jerarquía de prototipos lógicos inmanentes en los fenómenos.**

En este criterio Bateson apela la comunicación entre dos organismos, siguiendo el modelo informático de cognición:

Si un organismo A emite una cierta señal para el organismo B con la intencionalidad de que B aprenda algo (obtenga información para actuar en consecuencia a la misma) acerca de un estado de A relevante para la supervivencia de ambos (una amenaza, sexo, alimento, etc.) B tiene que decodificar las señales de A. Para decodificarlo ha de obtener antes el significado de tales indicaciones procedentes de A. Esto implica que B ha de recibir señales que permitan decodificar códigos, mensajes sobre la codificación, constituyendo así una clase diferente de información<sup>339</sup>. Lo que determina mensajes sobre mensajes, llamados también “metamensajes” o “metacódigos” por el propio Bateson. Así se genera una jerarquía de prototipos lógicos<sup>340</sup>.

Bateson se apoya en una premisa de diferentes niveles entre las redes de señalización de un organismo<sup>341</sup>, sus transcripciones y los principios decodificadores (como por ejemplo la disposición topológica en el espacio de una enzima<sup>342</sup>). Los rasgos fundamentales de una cascada de transducción en un sistema celular dado, tienen un carácter casi

---

<sup>338</sup> Pongamos dos ejemplos del efecto Baldwin: Supongamos una especie amenazada por un nuevo predador y un comportamiento que hace más difícil al predador la caza de su presa. Los individuos que aprenden más rápidamente estarán en ventaja. A medida que el tiempo avance, la habilidad para aprender el comportamiento mejorará por selección genética hasta que en cierto momento parezca ser un instinto. El otro ejemplo es la aparición de la tolerancia a la lactosa en las poblaciones humanas con una larga tradición de animales domésticos productores de leche.

<sup>339</sup> Bateson, G. Ibid. p. 128.

<sup>340</sup> Idea referenciada de Bertrand Russell y Alfred North Whitehead en su “Principia Mathematica”.

<sup>341</sup> Una cascada de señalización o ruta del segundo mensajero por ejemplo. Las moléculas de señalización intracelular en células eucariotas incluyen proteínas G heterotriméricas, pequeñas GTP-asas, nucleótidos cíclicos como AMP cíclico (AMPc) y GMP cíclico (GMPc), ion calcio, derivados fosfoinositoles como fosfatidilinositoltrifosfato (PIP3), diacilglicerol (DAG) e inositoltrifosfato (IP3) y varias proteínas quinasas y fosfatasa. Algunas de estas sustancias, como el AMPc y el GMPc también son llamados *segundos mensajeros* puesto que transducen señales extracelulares corriente abajo en la célula, hasta inducir un cambio fisiológico en un *efector* (sustancia que actúa directamente sobre una segunda provocando una modificación en el comportamiento de ésta), como, por ejemplo, una kinasa (enzima que transfiere grupos fosfatos desde ATP a un sustrato específico o diana) o un factor de transcripción (proteína que participa en la regulación de la transcripción del ADN, pero que no forma parte de la ARN polimerasa). Lodish et al. (2005). *Biología celular y molecular*. Buenos Aires. Médica Panamericana.

<sup>342</sup> La interacción estereoespecífica covalente es una propiedad química que hace referencia a la configuración en el espacio de la macromolécula, es unívoca, puesto que no hay conexión con otra estereoisomería posible.

universal, porque los mismos eventos ocurren en gran variedad de sistemas celulares y frente a una gran diversidad de estímulos. Por lo tanto, la detección de estímulos y la respuesta a los mismos en todos los seres vivos, depende dentro de las células de las señales de transducción. La transmisión de señales externas a un organismo de diferente naturaleza físico-química producen una regulación de determinados genes en su núcleo celular, por medio de un conjunto de mecanismos que comprenden primero, la captación de señales externas en la superficie celular mediante receptores celulares; segundo, la generación y transmisión intracelular de las señales por medio de interacciones entre proteínas; y tercero, la ejecución de la respuesta a través de una modificación de la actividad de los genes. Por lo que se muestra es, en términos de Bateson, una diferenciación potencial entre la actividad dentro de un contexto – la captación de señales externas en la membrana por los receptores y su posterior conducción intracelular por interacciones proteína-proteína – y la acción o conducta que define al contexto y lo torna inteligible – la respuesta genética y la consecuente adaptación conductual en referencia a la información recibida. En este aspecto tanto Bateson por su cuenta como Maturana por la suya, concuerdan en el tipo de comunicación sobre comunicación o “metacomunicación”, por lo que se observa tanto una discriminación de contextos, como unos indicadores de contextos o “marcadores”<sup>343</sup>.

Mas adelante veremos como las respuestas de los mixomicetos ante los estímulos naturales externos como la luz, y la temperatura afectan directamente a la motilidad, a la constitución morfológica y al desarrollo de su ciclo vital. Pero la interacción inducida por los científicos ante señales lumínicas expuestas en determinada secuenciación se transforma en una recepción decodificada de señales, y esto provoca una interacción entre seres vivos de diferente naturaleza cuya reacción del mixomiceto describe un aprendizaje, a través de una actividad de memoria química de corto plazo<sup>344</sup>. Es una reacción de condicionamiento pavloviano y condicionamiento respondiente, o modelo Estimulo-Respuesta, donde se da un conjunto de mensajes metacomunicativos, en la que la secuenciación de señales lumínicas actúa como la campanilla que provoca la salivación del perro.

Bateson argumenta que sólo encontró dos procesos potenciales que integrasen los seis criterios: uno era la autonomía y el otro era la muerte. La autonomía, considerada por Bateson como “control de sí mismo”, es proporcionada por la estructura del sistema. Es decir, a través de los circuitos de información el sistema va integrando mayor

---

<sup>343</sup> Por ejemplo, el gen lacZ, que codifica para  $\beta$ -galactosidasa es un identificador de bacterias E. Colli que han adquirido plásmidos recombinantes, es decir moléculas de ADN extracromosómico que pueden tener resistencia a los antibióticos basados en la fluorescencia o en proteínas destructora de células. Debido a que la  $\beta$ -galactosidasa es un homotetrámero, en que cada monómero esta hecho de una proteína lacZ- $\alpha$  y lacZ- $\omega$ , si solo una de estas proteínas se expresa en la célula resultante, no se formará la enzima funcional. De esta manera, si una cepa de E. coli que no tenga el gen lacZ- $\alpha$  en su genoma, es transformado usando un plasmidio que contiene el gen faltante, las células producirán  $\beta$ -galactosidasa, mientras que las no-transformadas no lo harán. Donahue J.R., R. A., Bloom, F. (1998) *Transformation efficiency of E. coli electroporated with large plasmid DNA*. Focus, Vol. 20, N° 3, pp. 77-79

<sup>344</sup> Ball, P. (2008) *Cellular memory hints at the origins of intelligence*. Nature, Vol 451, 24 January 2008, p. 385.

determinación del comportamiento del mismo. ¿Cuál será el contenido del material de señales que portan esos ciclos? Se pregunta Bateson. Información; información *sobre* el comportamiento del agente. Si va más lento o si más rápido en su motilidad o en los procesos metabólicos, por ejemplo. O si reconoce gradientes de azúcar en el entorno para fagocitar, o gradientes de acidez, térmicos, etc. De hecho en los círculos funcionales más elementales ya contienen ese tipo de información en respuesta bioquímica provocando la autorregulación. Pero a medida que se jerarquizan los sistemas organizativos de un ser vivo, también se jerarquizan los contenidos informativos hacia una estabilidad estructural y una dinámica autorregulativa “botton up” y “top down”.

Respecto a la muerte, Bateson argumenta que la relación es estrecha primero con el primer criterio, según la cual la entidad debe de estar conformada de múltiples partes. “En la muerte, estas partes son desmontadas o aleatorizadas (Ibid. p. 141). Pero también está ligada al cuarto criterio, puesto que la muerte es la disgregación o la aniquilación de dichos circuitos funcionales, y por lo tanto de su autonomía.

Por lo que tendremos que un sistema cognitivo:

- Es capaz de finalidad y de elección por vía de sus capacidades correctivas.
- Es capaz de permanecer en un estadio estacionario, o de desenfrenarse, o una fase intermedia.
- Es influido por “mapas” (Gegenwelt) no por el territorio.
- Estará limitado por la generalización de que su recepción de información (Wirkwelt) nunca podrá *probar* nada acerca del mundo (Umwelt) o acerca de sí mismo (Innenwelt). Solo *indagar*.
- Aprenderá y recordará, incrementando su neguentropía de forma experimental acumulando energía y jugando estocásticamente, a modo de ensayo-error.
- Todos sus mensajes serán de uno u otro tipo lógico, sometándose a las posibilidades de error en la tipificación lógica.
- Será capaz de unirse con sistemas similares para conformar totalidades aún mayores, generando así una emergencia social compleja; es decir, un nicho ecológico y semiótico.

Estos criterios de Gregory Bateson sobre los procesos cognitivos se han enlazado con los procesos cognitivos de Humberto Maturana. Habiendo nacido ambos en el año 1969 y desde el interés por el desarrollo cibernético, ambos autores forjaron sus concepciones de forma autónoma y en diferentes caminos. Mientras que Bateson trabajó desde la intuición científica forjada del método observacional, típico del psicoanálisis, Maturana lo hizo desde la propia cibernética con un lenguaje innovador. Parafraseando a Paul Dell (1985), Maturana contiene la ontología que Bateson no desarrolló. Mientras que Bateson expone sus ideas en una especie de “cosmología” de la biología para una epistemología cibernética, Maturana realiza una ontología de la biología en una epistemología que conjuga con las ideas de Bateson. Maturana resume su analogía con las ideas de Bateson en estos tres puntos implicados anteriormente con las de Bateson:

1° Una red autopoietica es una red de componentes interactuantes. Aquí conjuga con Bateson en tanto que la mente es un agregado de partes o de componentes interactuantes. O sea que mente/cognición y red autopoietica fundamentan dos estadios homeomorfos plausibles (que no idénticos en sí, como se observaba de la incorrecta tautología entre vida y cognición). Mientras que en Bateson la interacción de las partes de la mente es desencadenada por la diferencia, para Maturana la diferencia es un fenómeno no sustancial que no se encuentra ni en el espacio ni en el tiempo. La diferencia más bien está relacionada con la neguentropía y la entropía, en vez de con la energía (Bier 2008)

2° La respuesta de un organismo requiere de acoplamiento estructural y de patrones no lineales. Algo que encaja con la idea de Bateson, en el que un proceso mental requiere de una energía colateral.

3° La caracterización de un sistema vivo, en término de patrones no lineales infiere autopoiesis. La causalidad no lineal generan estructuras disipativas. En este caso sigue el punto en que Bateson explica que un proceso mental/cognitivo requiere de procesos circulares (o más complejos) de determinación. Los sistemas autopoieticos requieren de patrones no lineales como las ecuaciones de Reacción-Difusión que hemos estudiado anteriormente, y que sirven de patrón no lineal para las oscilaciones no acopladas en los autenticos plasmodios *Physarum polycephalum*, de los que estudiaremos con mayor profundidad más adelante. Igualmente los factores de concentración de múltiples células de *Dictyostelium discoideum*, o de *Dictyostelium mucoroides* – observados ya por el propio Uexküll (1940) – por el AMPc generan patrones de estructuras disipativas de Belousov-Zhabotinsky. Estos, entre otros factores, como el papel del  $Ca^{2+}$  en la actinmiosina en el flujo de corriente (streaming) del protoplasma del *Physarum* forman parte de lo que se consideran como factores regulatorios adaptativos, fundamentales para la generación de procesos cognitivos mínimos. Veamos cómo se deduce esta teoría, desde el papel de la autonomía biológica

### **Fundamento cognitivo indispensable: el papel de la regulación**

Hemos visto en el capítulo sobre la autopoiesis que uno de los papeles fundamentales para el desarrollo de un sistema vivo es su autonomía operativa en conformidad al programa interno que determina las acciones básicas en que el sistema reacciona a los estímulos del entorno –donde esos estímulos actúan sobre el sistema a través de ciertos receptores internos acoplados estructuralmente al entorno. De hecho Varela y Maturana (1973) determina en su teoría autopoietica que el problema de la autonomía se ha de ceñir en su forma mínima, en la caracterización de la unidad viviente.

Un sistema autónomo que se automantiene, en tanto que son autopoieticos, generan caminos de desarrollo y de organización coherentes, permitiendo ser descritos como agentes. Pero la relación entre la agencia y la cognición, dentro del marco de la autonomía, aún es precaria. Con que un sistema autónomo se auto-mantenga, ofreciendo un equilibrio homeodinámico, no es razón suficiente para la emergencia de una semiosis discriminatoria, y por consiguiente de un principio mínimo cognitivo.

En suma, las redes básicas de auto-mantenimiento del metabolismo, capaces de ciertas formas de respuestas de adaptación, no muestran esas capacidades necesarias para el surgimiento de la cognición mínima. Es necesaria una organización más compleja, que albergue los mecanismos que van más allá de dicho metabolismo básico. Es decir, que los mecanismos de compensación interna de las interacciones con el medio inmediato son responsables de la emergencia de una discriminación biosemiótica de segundo nivel – macromolecular – que permita tanto la recepción distinguida entre lo que es ruido de lo que es significativo para el sistema autónomo agencial.

También hemos visto la generación de subsistemas autopoieticos a la hora de poder explicar los dominios mínimos de actividad perceptiva en una organización autopoietica estable estructuralmente. Éstos establecen un nuevo criterio de autonomía interdependiente, dentro de una jerarquización en la organización de los seres vivos. Los propios componentes celulares son establecidos como subsistemas autopoieticos interdependientes en un nivel jerárquico inferior a la célula. Subsistemas que comprenden una enactividad mínima subveniente tanto morfológica como fisiológicamente, ejerciendo una funcionalidad regulatoria específica. Podemos decir, en palabras de Leonardo Bich y de Álvaro Moreno (2013; 2015) que son subsistemas regulativos específicos.<sup>345</sup>

Se entiende como regulación como la capacidad de los seres vivos de compensar internamente las perturbaciones (Bich y Moreno 2013). Los fenómenos ambientales exógenos al organismo o perturbaciones, son gestionadas por los sistemas agenciales que confieren significación y, por lo tanto una biosemántica intrínseca a los patrones dinámicos de autoregulación transducidos. En palabras de Piaget, se trata de una asimilación y de una acomodación (Piaget 1967) a la clausura operacional del agente para la superación del binomio “estímulo – respuesta”. Es decir, que la interacción entre un organismo y el entorno a través de la adaptación ontogenética considerada como una asimilación de influencias externas, implica una autoregulación interna, o acomodación, y por lo tanto una reestructuración del sistema. Esto aporta una visión dinámica y cíclica de la autoregulación: acción endógena → interacción con el Umwelt → compensación autoregulatoria de la perturbación → re-equilibrio interno, etc.

Para lograr un control reglamentario efectivo es necesario un subsistema autopoietico interdependiente. Pero que sea lo suficientemente independiente de la dinámica de los procesos controlados, y que se pueda variar sin interrumpir estos procesos; aunque también sea capaz de estar vinculado a las partes del mecanismo de control del sistema – es decir, un subsistema regulado – con el fin de ser capaz de modular sus operaciones (Bich y Moreno 2015). Más específicamente, la aparición de un subsistema de

---

<sup>345</sup> Una cuestión teórica fundamental consiste en el hecho de que el objetivo de Leonardo Bich y Álvaro Moreno es el modelado de un sistema a las que nos podemos atribuir su propio propósito y normatividad. Esta normatividad interna surge de la estructuras disipativas lejos del equilibrio (FFE), la auto-producción y mantenimiento de la organización de los organismos vivos. Y por eso nuestro discurso está próximo a la Biología de Sistemas y no en la tradicional modelación cibernética. La dimensión orientada hacia los objetivos de la regulación tiene que ser tenido en cuenta en su carácter biológico. Bich, L, Moreno A (2015) *The role of regulation in the origin and synthetic modeling of minimal cognition*. BioSystems.

regulación implica que el organismo genera en sí misma un conjunto de procesos desacoplados dinámicamente desde la dinámica de su régimen constitutivo (Bich, Mossio, Ruiz-Mirazo y Moreno 2015). El desacoplamiento dinámico entre el regulador y los subsistemas constitutivos regulados significa que ambos - a pesar de que están correlacionados a través del sistema se integran (los componentes del regulador son producidos y mantenidos por la actividad de los subsistemas constitutivos regulados, y dicha actividad, a su vez, está modulada por el regulador) – trabajando a diferentes ritmos intrínsecos, como hemos visto en el sistema TCST de la bacteria *E. coli* anteriormente. Esto sucede cuando el funcionamiento del subsistema de regulación no es ni específica ni directamente determinada por la actividad metabólica de subsistemas constitutivos regulados: es decir, es “estequiométricamente libre” de este último (Griesemerand y Szathmáry, 2009), por lo que no hay balanceo bioquímico entre ellos. Más específicamente, la idea en la base de esta forma de desacoplamiento es que la activación y el funcionamiento del subsistema de regulación no es directamente dependiente de su concentración (o variación de la concentración), es decir, de su producción por los subsistemas constitutivos regulados, incluso aunque dichos subsistemas garanticen su presencia en el sistema. Por el contrario, la activación del subsistema de regulación es provocada por perturbaciones ambientales, y sus operaciones dependen de su organización interna y sobre la estructura de sus componentes funcionales. De tal manera el subsistema regulador puede trabajar operacionalmente distinta de los subsistemas constitutivos regulados, y puede, en principio, actuar como un controlador de regulación de subsistemas constitutivos regulados (Bich, Mossio, Ruiz-Mirazo y Moreno 2015).

En esta arquitectura organizacional, el papel funcional de un subsistema regulador es modular la red constitutiva básica, al cambiar entre distintos regímenes metabólicos disponibles en el sistema en relación a los cambios en las condiciones ambientales. Lo hace de tal manera que los nuevos regímenes metabólicos / constitutivos ha engendrado por interruptores reguladores deben ser capaces de hacer frente a las nuevas condiciones ambientales, ampliando la gama de perturbaciones o estímulos a los que el sistema puede responder de una manera rápida y eficiente, así como enriquecer el ámbito de las conductas funcionales dinámicas disponibles.

Lo crucial es que el organismo dotado de sistemas de regulación reacciona de una nueva forma, hace cosas de acuerdo a lo que reconoce y distingue en sus interacciones con el Umwelt el subsistema regulador autopoietico. En realidad, el “reconocimiento” de hecho, es un proceso complejo, ya que las características específicas de las interacciones con el Umwelt son responsables de desencadenar que el subsistema de reglamentación no pueda conducir directamente la respuesta del sistema, como en el caso de respuestas básicas de red. De hecho, la perturbación activa el subsistema de regulación, que a su vez modula la red básica constitutiva de tal forma como para hacer frente a la característica ambiental específica que desencadenó la respuesta reguladora (Bich y Moreno 2015).

Un par de ejemplos aplicables al mixomiceto *Physarum polycephalum* serían:

(a) que el organismo se alimenta de una nueva fuente de alimentos de mayor riqueza en nutrientes que le permita ganar más energía, aunque tenga que decidir por escoger el trayecto de peor condición ambiental que el que debería de recorrer con una fuente de alimentación pobre en nutrientes (Takagi, Nishiura, Nakagaki, Ueda, Ueda 2006).

(b) que transforma su morfología – de plasmodio a esclerótido – para su conservación en un ambiente hostil carente de alimentos, minimizando su respiración (Seifriz 1939) maximiza su longevidad (Seifriz 1939; Gehenio 1944; Jump 1954).

En otras palabras, el hecho de reconocimiento es una consecuencia de la especificidad de la perturbación y de la organización normativa interna del sistema.

En tal escenario una perturbación ambiental se convierte en una interacción específica y reconocible debido a la naturaleza de la relación que mantiene con el subsistema regulador. El subsistema regulador es sensible a dicha perturbación, en el sentido de que endógenamente establece las clases de equivalencia en su entorno con respecto a estas variaciones específicas, de acuerdo a cómo las variaciones activan el subsistema regulador para desencadenar la acción regulatoria. Estas clases de equivalencia no consisten en asociaciones establecidas externamente entre las perturbaciones y los resultados de los cambios provocados en el sistema como un todo, como en el caso anterior. Más bien, son los resultados de la evaluación (activación del subsistema de regulación más la acción reguladora sobre los subsistemas constitutivos regulados) operados por el propio subsistema de regulación que logran una significación endógena y funcional para el sistema.

Por lo tanto, más allá del debate sobre si la cognición es coextensiva con la vida, está claro que la regulación se convierte en una condición necesaria para la aparición de la cognición, si consideramos como un aspecto esencial de la cognición que el cognoscente debe ser capaz de transformar una externa influencia en una integración adaptativa o, en términos cognitivos, en una interpretación significativa (Heschl, 1990; Bich y Moreno 2015). Y este requisito es fundamental para que la cognición se realice únicamente por la regulación, en lugar de por la auto-producción biológica básica y por el auto-mantenimiento (es decir autopoieticos mínimos sistemas), como algunos de los defensores de la tautología entre vida y cognición han argumentado. Un sistema con capacidad normativa, de hecho, es capaz de hacer las cosas de acuerdo a lo que distingue (lo que el subsistema de regulación es sensible). En consecuencia, las interacciones con el medio ambiente se convierten en algo más que una fuente de ruido confuso, sino que se convierten en un mundo generado de manera endógena (naturalizados) significados - un Umwelt, (Von Uexküll, 1926): las interacciones se convierten funcionalmente en “significativas” para el sistema en sí, sin serlo para un observador externo.

Aquí se utiliza el término “significado” como sinónimo de “funcional para el sistema”(ver Barandiaran, 2008). Más específicamente, una fuente de perturbación cobra sentido cuando se puede distinguir por el subsistema regulatorio y tal distinción tiene un efecto operativo en el sistema. A través de la acción del subsistema regulatorio

el sistema modula su propia actividad (en los subsistemas constitutivos regulados) sobre la base de esta distinción es como contribuirá a su propio automantenimiento.

Un tercer ejemplo (c) del *Physarum polycephalum* se puede establecer en la regulación del  $\text{Ca}^{2+}$  para la activación o la inhibición de la actina-miosina que permite las oscilaciones del flujo de corriente del plasmodio para su desplazamiento. Aquí el  $\text{Ca}^{2+}$  actúa como inhibidor de las oscilaciones de la actina-miosina, pero en el sentido inverso de la actividad inhibidora existente en los procesos de contracción de las células musculares animales. La ausencia de  $\text{Ca}^{2+}$  en los procesos neuromusculares inhibe la actividad contractora, mientras que en los plasmodios, la inhibición surge por el aumento de  $\text{Ca}^{2+}$  (Nakamura y Kohama 1999). Pero también el  $\text{Ca}^{2+}$  es un potente oscilador en presencia de AMPc en el entorno del plasmodio (Smith y Saldana 1992).

De la misma manera que hemos visto el fenómeno de quimiotaxis para la bacetria *E.colli*, también los mixomicetos ofrecen quimiotaxis específicas, tanto en el pseudoplasmodio pluricelular *Dictyostelium discoideum* (Bonner y Savage 1947; Gerisch y Ecke 2005; Song, Nadkarni, Böderek, Beta, Bae, Frank, Rappel, Loomis y Bodenschatz 2006) como en el plasmodio unicelular *Physarum polycephalum* (Keller y Segel 1971; Knoles y Carlie 1978; Ueda y Ogihara 1994) del que se estudiará con detenimiento su desarrollo. Mas en el caso de tomar el fenómeno de la quimiotaxis como una condición de posibilidad de proceso cognitivo, requiere como explica Bich y Moreno (2015) que parte de los subsistemas regulatorios sean independientes de los procesos metabólicos. Este caso constituye una forma compleja de taxis de estabilidad impulsada, logrado a través del acoplamiento de dos subsistemas, y una realimentación indirecta a través del medio ambiente. El movimiento aquí es autónomo y depende de la diferenciación interna de la organización y la actividad de auto-mantenimiento inherente de la célula. Además, este comportamiento es funcional en el sentido de que contribuye al mantenimiento de las condiciones de la existencia del metabolismo y, en consecuencia, de todo el sistema. Sin embargo, en este ejemplo, a pesar de que el sistema es capaz de comportamientos viables complejos, el sistema responde como una red en conjunto, sin distinguir entre las características específicas de su interacción con el medio ambiente, la evaluación de las mismas y la modulación de su acción en consecuencia. En este caso, el medio ambiente constituye sólo una fuente de ruido que perturba el metabolismo, y la respuesta conductual se filtró a través de este último.

Este mecanismo quimiotáctico implica al menos tres complejos moleculares: (a) un subsistema receptor, que se activa por efectores medioambientales (quimioatrayentes y quimiorepelentes); (b) una punta conductora seudópoda en el caso de los plasmodios y pseudoplasmodios, y (c) un grupo de moléculas, y filamentos macromoleculares que actúan como un puente entre los dos. Por lo general, estas últimas moléculas se activan a través de modificaciones no covalente post-traduccionales, tales como cascadas de fosforilaciones.

La característica distintiva de este más complejo caso de comportamiento quimiotáctico es que el sistema, gracias a la acción de un subsistema de regulación, es capaz de

modular sus comportamientos sobre la base de las interacciones específicas con el medio ambiente, que adquiere un significado operativo específico para el sistema, de tal manera que este último es capaz de cambiar su comportamiento en consecuencia. Esto se hace posible por el hecho de que el subsistema de regulación está desacoplado de los demás. Esto significa que el subsistema regulatorio – en el caso de los plasmodios *Physarum polycephalum* sería el patrón de Reacción-Difusión (Keller y Segel 1970) a través de los filamentos de actina-miosina y de los microtúbulos. Es el estímulo que proviene de atrayentes o repelentes (externos) que obligan a adaptar el material a su comportamiento espacial. El mecanismo específico utilizado es la difusión de atrayentes o repelentes dentro del medio ambiente. La presencia de estos estímulos en la periferia del material proporciona el impulso para su adaptación morfológica (Mayne, Adamatzky y Jones 2015).

Este desacoplamiento, en realidad, introduce un nuevo grado de libertad en el sistema, uno o más variables nuevas en el regulador del subsistema que no dependen directamente sobre el régimen constitutivo y por lo tanto puede ser sensible a algo diferente que el estado interno del sistema: en este caso una característica del medio ambiente. Tal característica adquiere importancia para todo el sistema, y el subsistema de desacoplado logra un papel funcional cuando se produce el efecto de su acción reguladora, provocada por la perturbación, contribuye a el mantenimiento del sistema. A partir de este mecanismo quimiotáctica relativamente elemental, entonces, una variedad de conductas tácticas más complejas se puede implementar (Bich y Moreno 2013; 2015). Lo que es común a ellos, es que no pueden ser tratados en términos de insumo-producto, como si el comportamiento del sistema fuera expulsado por la perturbación. Por el contrario, pueden ser caracterizados en términos de generación endógena de respuesta adaptativa al centrarse en la organización interna del sistema y, sobre todo, de subsistemas de regulación.

Por lo que llegamos a la conclusión de la quimiotaxis de los mixomicetos – como la bacteriana – representan un claro ejemplo comparativo de cómo ciertas capacidades fundamentales para el origen de la cognición puede surgir en los sistemas vivos mínimos, y de cómo esto es posible sólo a través de la acción de los mecanismos de regulación. Sólo en presencia de la regulación que las perturbaciones específica adquieren un significado para el sistema. Éste es un fundamento biosemiótico de los fundamentos de los principios mínimos cognitivos que, surgiendo de los factores reguladores del sistema, adquieren todos aquellos principios mínimos ofrecidos en la biología cognitiva (Maturana 1970; Bateson 1979; Mautana y Varela 1980; Müller, di Primio y Lengeler 2001; Lyon 2006).

Un breve estudio de una especie de mixomicetos:

*Physarum polycephalum*



Fig. 25. Mycetozoa. — Pilztiere. Haeckel, Kunsffonnen dar Natur. Tafel 93 — Arcyria.

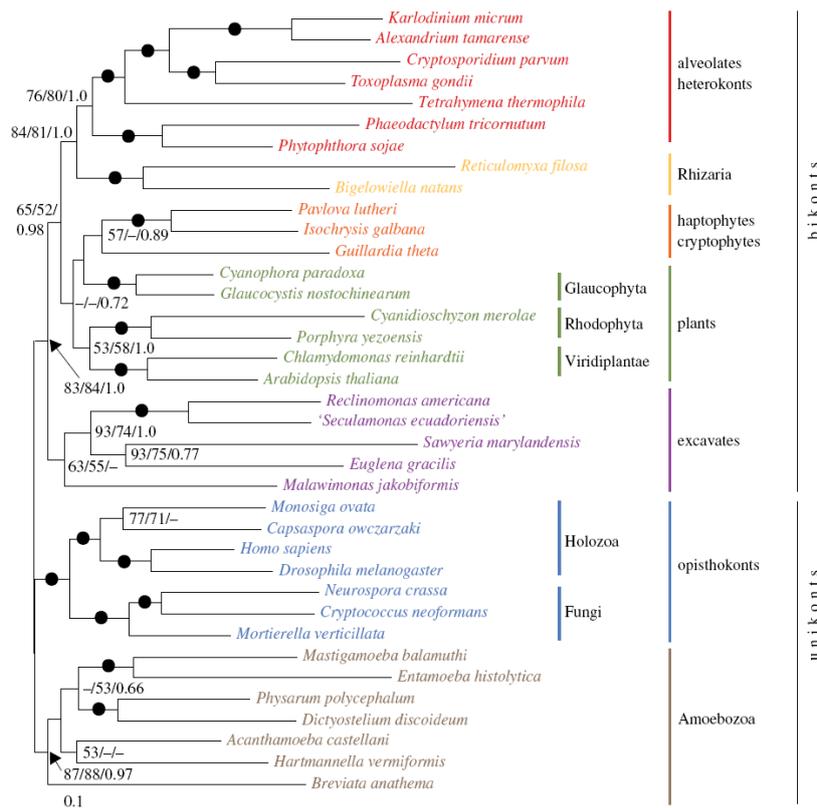


Fig. 26. Una filogenia global de los eucariotas. La probabilidad máxima de árboles con valores de apoyo de arranque (*Bootstrap support Values* o BV)<sup>346</sup> deducido de un alineamiento de aminoácidos de 78 genes concatenados (17.283 caracteres). Valores de apoyo Bayesiano PP<sup>347</sup> para biparticiones también se muestran si hay más de 0,50. Los símbolos en negro indican los valores de apoyo de 100% BV y PP 1.0 y guión (K) marca el valor de la ayuda por debajo de 50% o 0,50 BV PP. Nodos sin denotación recibido menos del 50% BV y PP a menos de 0,50. Los mixomicetos *Physarum polycephalum* y *Dictyostelium discoideum* son englobados en el supergrupo de *Amebozoa* (Mingé, et al. 2009).

<sup>346</sup> La idea básica del Bootstrap support Values (BV) es re-muestrear todas las columnas en la alineación al azar un número determinado de veces (por ejemplo 1000), por lo que cada columna se pueden muestrear más de una vez. Luego se vuelve a dibujar un árbol por cada nuevo muestreo utilizando las columnas muestreadas (para 1.000 árboles, por ejemplo, obtener una secuencia diferente cada vez, pero los datos dependerán de la secuencia original). Si un grupo se produce el 100% del tiempo de uso de los distintos muestreos, el valor es el apoyo de arranque será de 100; si sólo se produce por ejemplo 30% del tiempo, el valor es de 30. Estos valores se representan como una especie de nivel de confianza de que la agrupación se produce en su árbol original.

<sup>347</sup> Thomas Bayes, un clérigo del siglo XVIII, desarrolló el siguiente teorema, que fue conocido después de su muerte, para el cálculo de probabilidades condicionales:

Sea  $\{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n\}$  un conjunto de sucesos mutuamente excluyentes y cuya unión es el total o sea 1, y tales que la probabilidad de cada uno de ellos es distinta de cero. Sea B un suceso cualquiera del que se conocen las probabilidades condicionales  $P(B/A_i)$ . Entonces la probabilidad  $P(A_i/B)$  viene dada por la expresión:

$$P(A_i|B) = \frac{P(B|A_i)P(A_i)}{P(B)} = \frac{P(B|A_i)P(A_i)}{\sum_{j=1}^n P(B|A_j)P(A_j)}$$

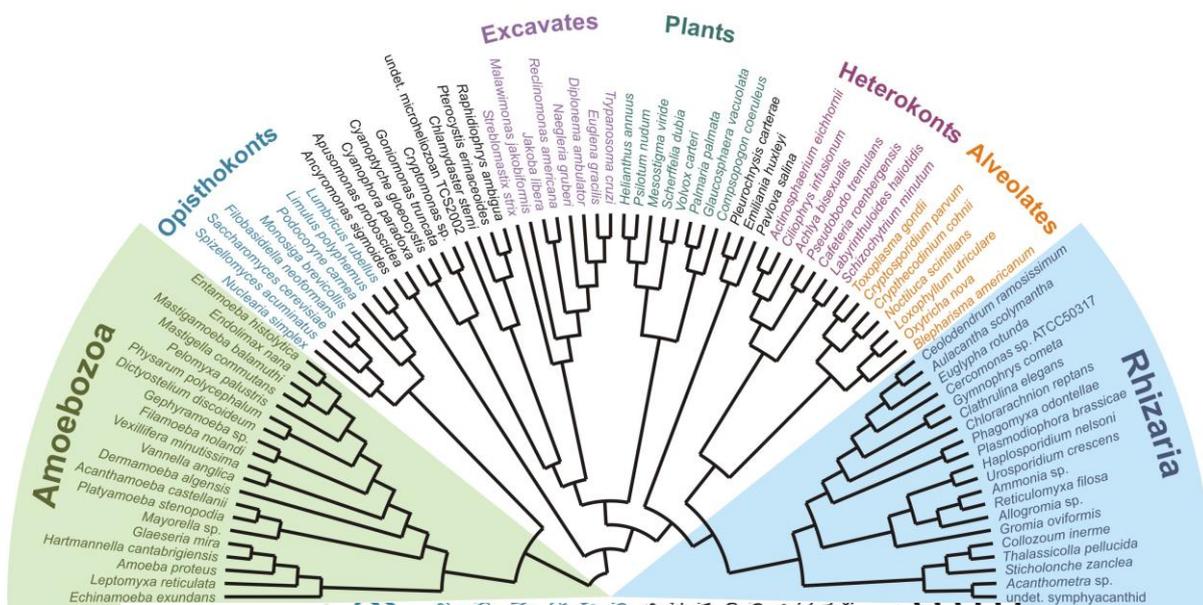
donde:

$P(A_i)$  son las probabilidades a priori.

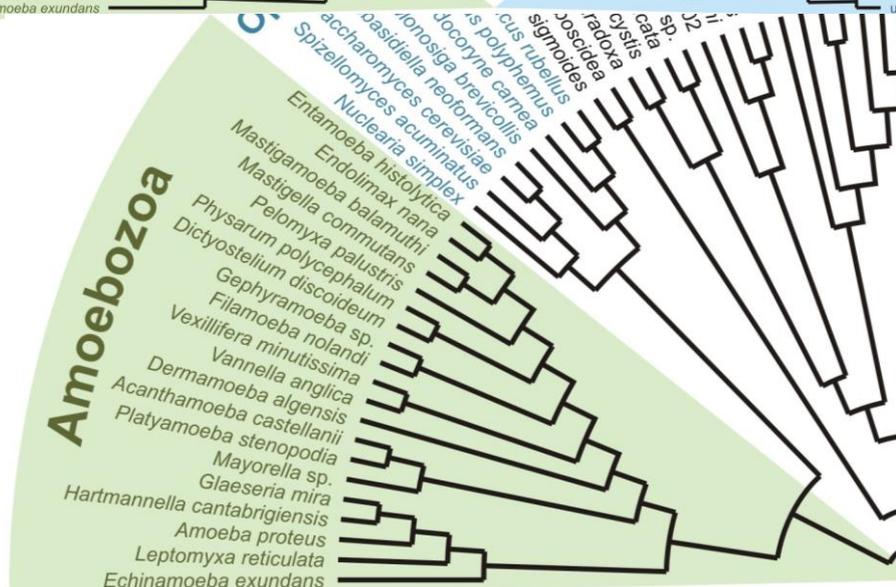
$P(B / A_i)$  es la probabilidad de B en la hipótesis  $A_i$ .

$P(A_i / B)$  son las probabilidades a posteriori.

Esto se cumple siempre que  $\forall i = 1 \dots n$



(a)



(b)

### Árbol de eucariotas

Figura 27(a). El árbol filogenético molecular de eucariotas fue objeto de cambios importantes durante los últimos años. En su forma más reciente, el árbol consta de seis-ocho supergrupos y un número de pequeños, los linajes independientes (Baldauf 2003). Se ha propuesto que su raíz debe ser colocado entre los eucariontes ancestralmente poseen un solo flagelo (Opisthokonts + Amoebozoa), y aquellos que poseen dos flagelos ancestral - la Bikonts (Stechmann y Cavalier-Smith 2003). En este marco, la mayoría de las ramas protistas ameboides dentro de uno de los dos supergrupos Amoebozoa y Rhizaria. La filogenia molecular de estos dos supergrupos, están basados en el ARN ribosomal, en una pequeña subunidad de actina y una secuencias de genes.

Fig. 27(b) Ampliación del supergrupo de Amebozoa donde se encuentran clasificados los mixomicetos de nuestro estudio: *Physarum polycephalum* y *Dictyostelium discoideum*. Molecular Systematics Group. Department of Zoology and Animal Biology. University of Geneva.. <http://www.biani.unige.ch/msg/Amoeboids/Eukaryotes.jpg>

## Capítulo 7. Aspectos morfológicos y fisiológicos de los Mohos Mucilaginosos o Mixomicetos

Un moho mucilaginoso – en inglés *Slime molds* – también llamado moho del fango, hongo mucoso o moho acuático son términos laxos que se utilizan para describir a aproximadamente seis grupos de Eukarya. Se caracterizan porque en alguna etapa de su ciclo de vida forman agregados multinucleados (plasmodios) o multicelulares (pseudoplasmodios) que se deslizan por el suelo alimentándose de materia vegetal en descomposición. Unos pocos son parásitos. Se pueden encontrar en el suelo, sobre el césped y en los bosques caducifolios. También son comunes en el mantillo de hojas o incluso en el limo que se acumula en los canalones. Algunos son acuáticos, de agua dulce o marinos. Antiguamente estos organismos se consideraban hongos, pero actualmente se clasifican como protistas y se dividen en varios grupos:

- Myxogastrea: mohos mucilaginosos plasmodiales o cenocíticos.
- Protostelia: mohos mucilaginosos plasmodiales más pequeños.
- Dictyosteliida: mohos mucilaginosos celulares.
- Acrasidae: con un ciclo de vida similar a Dictyosteliida, pero de taxonomía incierta; actualmente se clasifica en Percolozoa.
- Plasmodiophorida: parásitos obligados de plantas, clasificados en Cercozoa.
- Labyrinthulomycetes: mohos mucilaginosos celulares reticulares, clasificados en Heterokontophyta.

Myxogastrea, Protostelia y Dictyosteliida forman el grupo *Myxomycota*, que a su vez se clasifica en el subfilo de *Conosa*, integrado en el filo de *Amoebozoa*<sup>348</sup>, que forma parte del supergrupo de *Eukarya Unikonta*, mientras que el resto de los mohos mucilaginosos forman parte del supergrupo Bikonta. Cada uno de los grupos organiza plasmodios distintos. Nosotros nos vamos a detener en el estudio de los Mixomicetos.

### Mixomicetos

Myxomycota, Mycetozoa o Mixomicetos es un grupo peculiar de *protistas*<sup>349</sup> – mohos mucilaginosos – que toman tres formas distintas durante el transcurso de su vida. Inicialmente tienen forma de *ameba unicelular* que se mueve mediante pseudópodos o *flagelos* dependiendo de la cantidad de agua en el medio. Bajo ciertas condiciones,

---

<sup>348</sup> El clado Amoebozoa comprende un gran número de protistas ameboides y la mayoría de los mohos mucosos. Sin embargo, otros ameboides que antiguamente formaban parte del grupo de los rizópodos han ido a parar a otros clados. El carácter morfológico de la presencia de pseudópodos no es exclusivo de este clado, lo que ha llevado a la confusión de agrupar a protistas no relacionados en las antiguas clasificaciones. Algunos miembros son multinucleados y otros forman agrupaciones que son un modelo para la multicelularidad (Dictyosteliida).

<sup>349</sup> El reino Protista, también llamado Protoctista, es el que contiene a todos aquellos organismos eucariontes que no pueden clasificarse dentro de alguno de los otros tres reinos eucarióticos: Fungi (hongos), Animalia (animales) o Plantae (plantas). En el árbol filogenético de los organismos eucariontes, los protistas forman varios grupos monofiléticos separados, o incluyen miembros que están estrechamente emparentados con alguno de los tres reinos citados. Se les designa con nombres que han perdido valor en la ciencia biológica, pero cuyo uso sería imposible desterrar, como “algas”, “protozoos” o “mohos mucosos”.

como cambios en el medio, forman masas gelatinosas que se deslizan lentamente por el suelo. Esta es la etapa que normalmente se observa como moho mucilaginoso. Por último, el moho desarrolla un *cuerpo fructífero* que forma esporas, superficialmente similar a los esporocarpos de los hongos.

El modo primario de nutrición es por fagocitosis: la célula rodea las partículas potenciales de alimento, encerrándolas en vacuolas donde pueden ser digeridas y absorbidas. Los mixomicetos y otras amebas tienen un bulbo posterior llamado uroide, que puede servir para acumular los productos de desecho, separándose periódicamente del resto de la célula. Cuando el alimento escasea, la mayoría de las especies pueden formar quistes, que pueden ser llevados por el viento a otros lugares.

Vamos a estudiar más a fondo uno de los mixomicetos que se ha dado más a conocer y a investigar su comportamiento en estos últimos años.

### **Physarum polycephalum: Breve resumen morfológico y fisiológico**

*Physarum polycephalum* es uno de los mohos mucilaginosos pertenecientes al filo Amoebozoa, del intrafilo Myxomycota, y de clase Myxogastrea, a menudo denominado moho de muchas cabezas. Se encuentra en zonas de sombra, frescas y húmedas, tales como entre hojarasca y en troncos en descomposición. El *Physarum polycephalum* es por lo general de color amarillo, y se alimenta de esporas de hongos, bacterias y otros microbios. Es un organismo muy fácil de hacer crecer en cultivos y se utiliza como organismo modelo para los estudios de circulación ameboide y movilidad celular.

#### **Ciclo de vida**

La principal fase vegetativa del *Physarum polycephalum* es el plasmodio, una masa de venas de protoplasma con numerosos núcleos que se desliza por el suelo buscando las partículas de alimento, segregando enzimas para fagocitarlo. Si las condiciones ambientales hacen que el plasmodio se deshidrate, se formará un esclerocio. Este es básicamente un tejido endurecido multinucleado que sirve como etapa latente, permitiendo la protección de *Physarum* durante largos períodos de tiempo. Una vez que las condiciones favorables se reanudan, el plasmodio reaparece para continuar con su búsqueda de alimento.

Cuando falta el alimento, el plasmodio finaliza la fase de alimentación y comienza con su fase reproductiva. A partir del plasmodio se forman tallos de esporangios – también llamados cuerpos fructíferos – y dentro de estas estructuras se produce la meiosis formándose y conteniéndose esporas. Los esporangios suelen formarse en espacios abiertos para que las esporas se propaguen por medio del viento.

Las esporas pueden permanecer latentes durante años si es necesario. Sin embargo, cuando las condiciones ambientales son favorables para el crecimiento, las esporas germinan y liberan células flageladas o ameboides (etapa móvil). Las células se fusionan para formar un nuevo plasmodio, como ahora veremos.

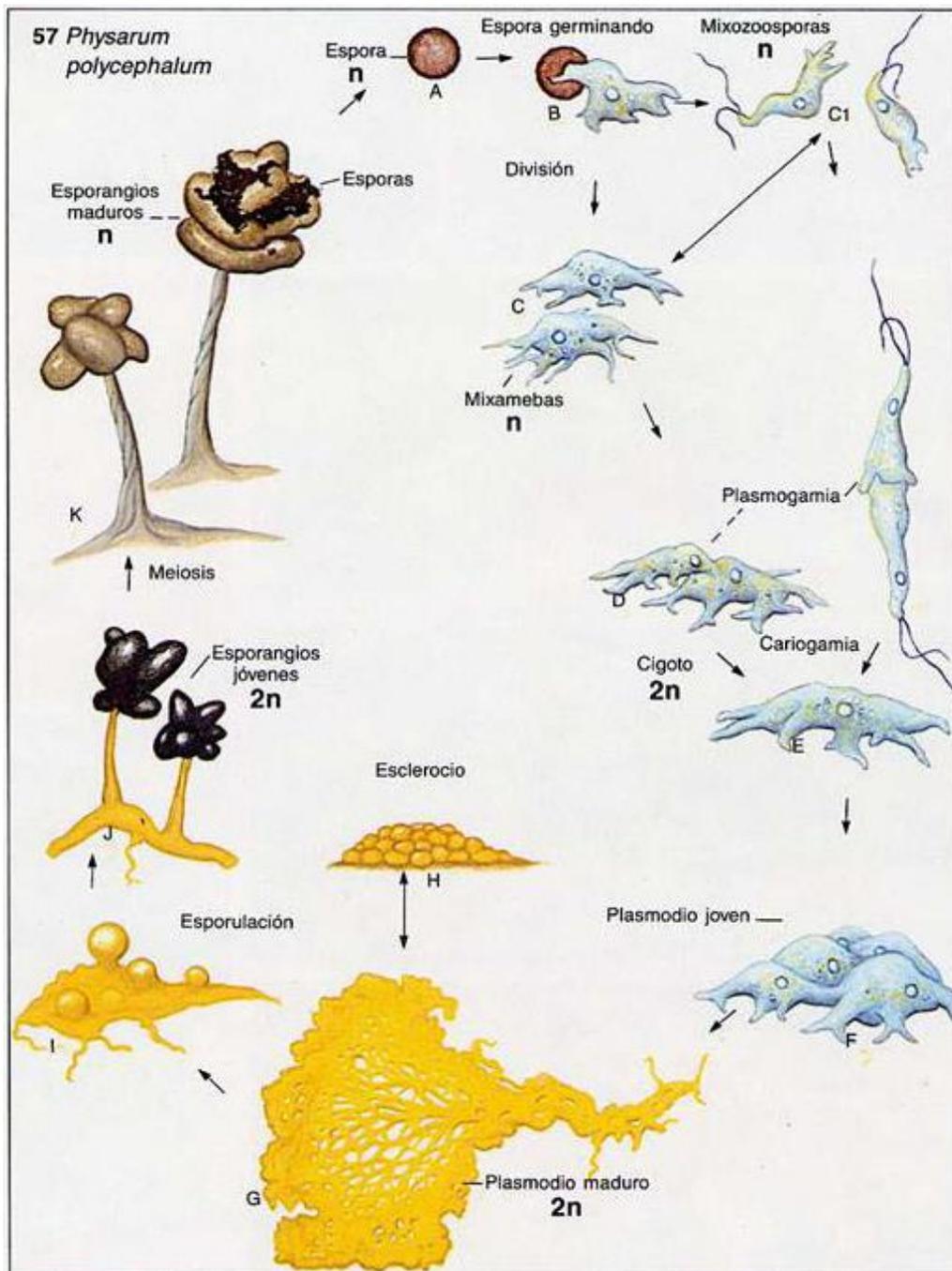
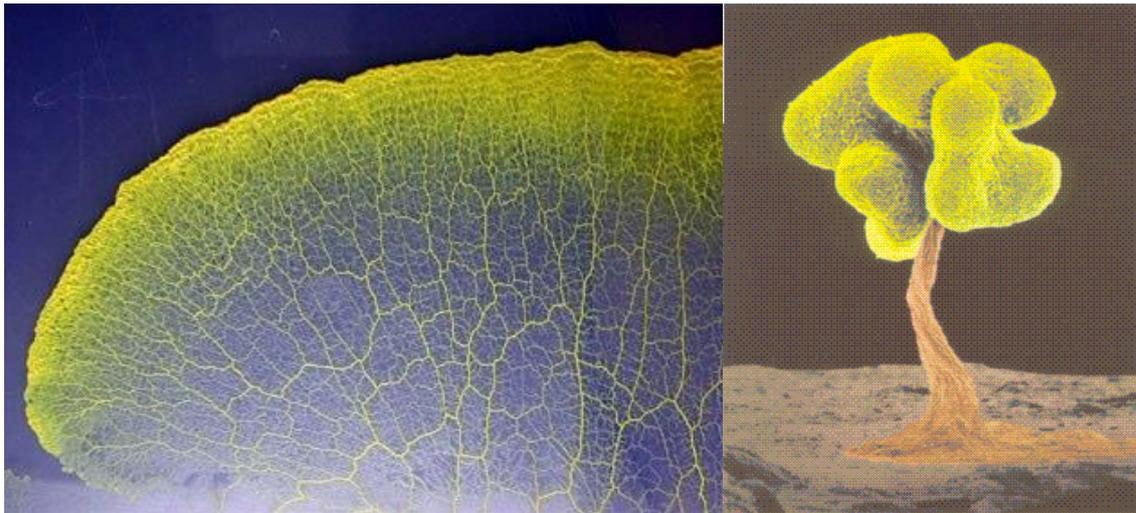


Fig. 28. Ciclo de vida “gamético” del *Physarum polycephalum*. La espora germina para producir una ameba haploide. Esta última a veces pueden desarrollar flagelos, las dos formas de ser interconvertibles, y ambos se dividen por fisión binaria. Se produce un atajo gamético si la mitosis de myxoameba no es equivalente a la generación de un gametofito. Finalmente, fusionan dos amebas sexualmente compatibles para formar un cigoto. En el cigoto diploide, las divisiones nucleares no van seguidas de las divisiones celulares. Por lo tanto, el cigoto se convierte en una ameba gigante multinucleada, o plasmodio, en el que las divisiones nucleares son sincrónicas. En última instancia, el plasmodio se somete a una transformación que da lugar a la producción de uno o más cuerpos fructíferos, típica de la especie en particular. La formación de cuerpos fructíferos es acompañada por la hendidura de gran parte de su protoplasma en porciones uninucleadas que maduran en esporas, donde tiene lugar la meiosis. Cuando se seca el cuerpo fructífero para arriba, las esporas se liberan (Fiore-Donno 2005).



(a)

(b)

Fig. 29(a). Plasmodio de *Physarum polycephalum* de gran tamaño. Cortesía Tetsuo Ueda.

Fig. 29(b). Microfotografía de un cuerpo fructífero o esporangio de *Physarum polycephalum* de 3mm de altura, con esporas de 10  $\mu\text{m}$ . Cortesía de Henry C. Aldrich.

### **Movimiento y comportamiento de transmisión de flujo (streaming)**

Los cambios en la forma de la célula y el tamaño se miden durante la locomoción, así como la fuerza motriz de transmisión del flujo del protoplasma, en diversas células ameboides en diferentes etapas de su ciclo de vida, y bajo diversas condiciones ambientales. A pesar de un cambio en el tipo de célula en el ciclo de vida de *P. polycephalum*, éste mostró un patrón de tiempo similar de locomoción, mostrando oscilaciones que tiene una mezcla de varios períodos. Una oscilación regular con transporte de transmisión protoplásmico (streaming) aparece en el plasmodio sólo por encima de un tamaño crítico de célula. El intervalo de tiempo entre la ida y vuelta del protoplasma es de aproximadamente dos minutos. La fuerza del flujo varía para cada tipo de plasmodio.

La fuerza que mueve el flujo de protoplasma se genera probablemente por contracción y relajación de una capa membranosa que contiene actina (proteína globular que forman los microfilamentos, asociado con la contracción) miosina (proteína fibrosa, cuyos filamentos tienen una longitud de 1,5  $\mu\text{m}$  y un diámetro de 15 nm, y está implicada en la contracción por interacción con la actina) y tubulinas (proteínas que forman los microtúbulos, unas estructuras tubulares que intervienen en diversos procesos celulares que involucran desplazamiento de vesículas de secreción, movimiento de orgánulos, transporte intracelular de sustancias, así como en la división celular - mitosis y meiosis - aparte de constituir los flagelos en los mixomicetos). La capa de filamentos crea un gradiente de presión sobre el protoplasma, que fluye dentro de los límites de la periferia celular. Mas adelante vamos a estudiar estas proteínas que conforman la red sensible de la estructura tridimensional de las células y su participación activa en las pautas de relación con el entorno.

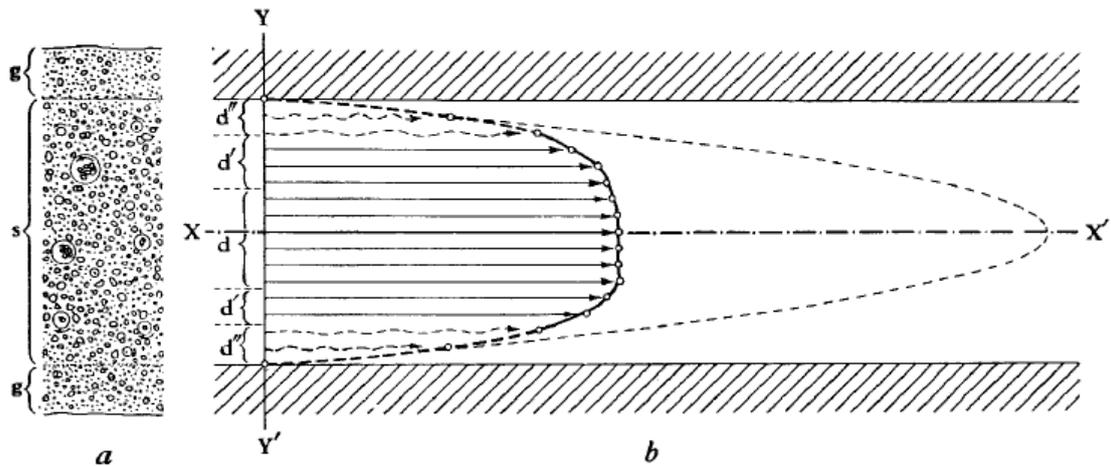


Fig. 30. (a) Visión microscópica de la cadena, de forma esquemática, *g*. En la pared del tubo capilar que consiste en el plasmagel, *s*, fluye el plasmasol. (b) La distribución de la velocidad del flujo intracapilar del protoplasma, pequeños círculos que representan los valores obtenidos experimentalmente. La línea discontinua fina indica la parábola extrapolada a partir de la curva experimental en la zona periférica de la circulación. XX' es el eje de la corriente; YY' es una sección imaginaria transversal de la corriente (Kamiya 1950a).

### Oscilaciones en el streaming

Los fenómenos oscilatorios en varias organizaciones biológicas han atraído el interés debido a que en estos fenómenos se esperan que sean las consecuencias de los mecanismos de retroalimentación regulados. Estos fenómenos también deben ser considerados como una estructura de disipación de los sistemas alejados del equilibrio. La locomoción de las células ameboides puede ser vista desde este punto de vista, pero hasta ahora sólo unos pocos casos se conocen en los que la motilidad ameboide sea rítmica. Estos casos se tratan de transporte de transmisión protoplásmico (streaming) en el plasmodio de los mixomicetos<sup>350</sup>.

*Physrum polycephalum* son ameboflagelados, que partiendo de una microcélula con un núcleo simple se irá dividiendo los núcleos sin haber separación del citoplasma – llamado también “sincintio”<sup>351</sup>. De esta manera se convierten en gigantes seres unicelulares, con la capacidad de una media de  $10^3$  núcleos por 5 cm de plasmodio y por encima de  $10^4$  núcleos en división mitótica sincrónica (Baldauf, Doolittle 1997), incluso puede sobrepasar los  $10^8$  núcleos (Kauffman 1974).

<sup>350</sup> También en los *Dictyostelium discoideum* como veremos más adelante (Satoh, Ueda y Kobatake 1985).

<sup>351</sup> Forman sincintios desde blastodermos de la *Drosophila melanogaster* hasta las placentas de mamíferos, músculos lisos, músculos cardíacos, músculos esqueléticos (formados por fusión como los *P. polycephalum*) formando uniones neuromusculares, etc.

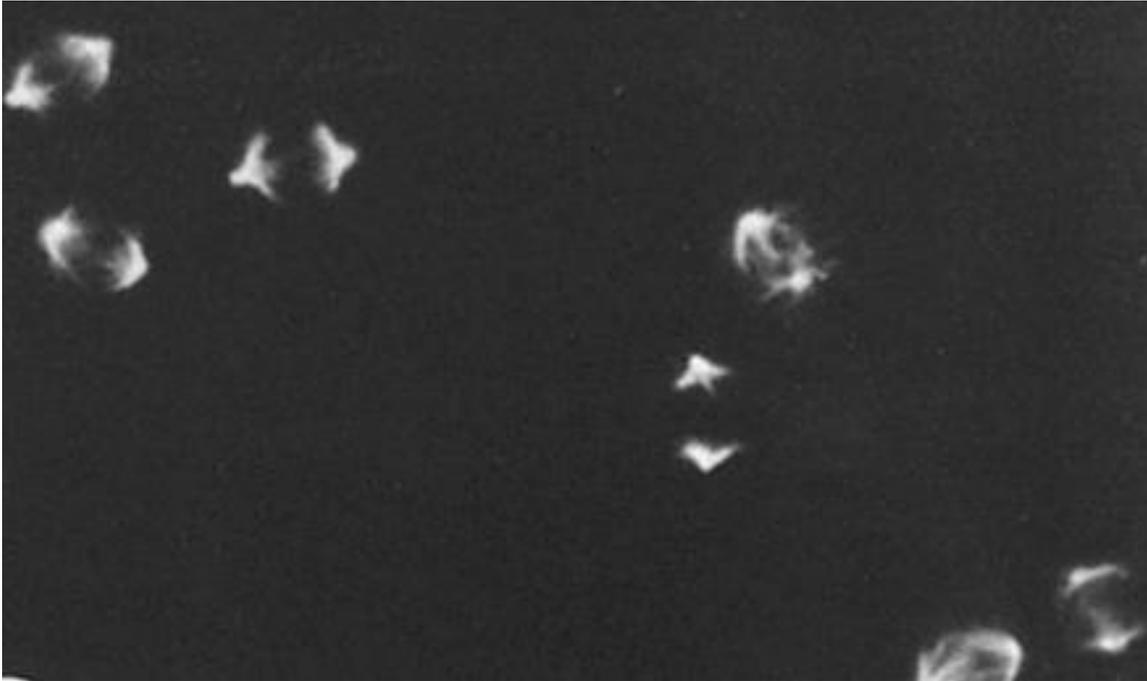


Fig. 31. Mitosis múltiple sincronizada en un único citoplasma del plasmodio *Physarum polycephalum*. (Diggins y Dove 1987)

Ocurre que también dos sincintios de plasmodio *Physarum* se pueden fusionar convirtiéndose en un sincintio con la suma de los núcleos. Pero es más, una característica del *Physarum* es que si cualquiera de las dos fases de vecinos se mezclan, la pareja fundida en última instancia, se sincroniza con una fase de las dos fases parentales vecinas con el arco más corto que los conecta. Esta es una evidencia fuerte para la presunción de un oscilador continuo subyacente. Llamamos arco de discontinuidad, según Stuart Kauffman (1974) a la propiedad topológica de la fase de sincronización entre pares de sincintios, con una caracterización de oscilador de relajación moderada, que gira más rápidamente cerca de la singularidad de su ciclo límite. De hecho ya existían estudios sobre isocronía en regiones del espacio celular<sup>352</sup>.

Por otro lado, P. Loidl y Sachsenmaier (1982) exponen que las fases de desplazamiento por la fusión de plasmodios heterofásicos contradicen el modelo de oscilador de ciclo límite de Kauffman y Wille.

La fusión de dos de plasmodios multinucleares de *Physarum polycephalum* – llamado también fenómeno de *anastomosis*<sup>353</sup> – que representan las diferentes etapas del ciclo mitótico provoca una sincronización rápida mitótico de los núcleos “jóvenes” (A) y “viejos” (B). Esta comunicación pone de manifiesto que incluso en la fase de

<sup>352</sup> El estudio de isocronía viene dado por A. Winfree en 1972 sobre los ciclos oscilatorios de glicolisis en la levadura (Ver Kauffman 1974). Kauffman definió la fase de los estados no sobre el ciclo por el estado como defendía Winfree sino en el ciclo con el que en última instancia se sincronizaban. La sincronía oscilatoria del *Physarum polycephalum* por la fusión había sido estudiada por primera vez por H. P. Rush y colegas en 1966 (Ibid).

<sup>353</sup> Del griego *αναστομωσις*, apertura de la comunicación. “cuando las células desnudas y dotadas de movimientos amiboideos de los Mixomicetes, semejantes entre sí, se unen sucesivamente en un gran número para formar el plasmodio” (de Leon 1884)

sincronización de grandes diferencias siempre se produce por el avance de los núcleos "jóvenes" y el retraso los "viejos". Esta constatación contradice el modelo de oscilador de ciclo límite, que permite la sincronización en el arco más corto del círculo de fase (avance B y retardar A) a diferencias de fase de más de 1 / 2 del ciclo.

En este contexto de los modelos de oscilación, nos preguntamos si hay alguna relevancia para un oscilador autónomo en los plasmodios. En pocas palabras, la idea de un oscilador autónomo mitótico ("oscilador continuo de ciclo límite<sup>354</sup>"), como se había propuesto para el plasmodios de *Physarum* por el grupo de Kauffman (Kauffman y Wille 1975; Wille et al 1977) es distinta del modelo de la escuela de Sachsenmaier – también conocido como modelo oscilador de extrema relajación – principalmente en tres aspectos: (i) el oscilador autónomo no está acoplado con el crecimiento celular, (ii) los cambios relativamente suaves son esperados por todos los componentes durante el progreso del ciclo celular y (iii) la periodicidad del oscilador es independiente de la temporización real de la mitosis. Evidencias experimentales que han sido discutidas anteriormente en apoyo del modelo de grupo Sachsenmaier naturalmente están en contra de algunas de las características importantes del modelo autonómico. No obstante, el modelo autónomo, por el contrario, se admite bastante bien por algunas observaciones hechas en sistemas de embriones primarios (Newport y Kirschner 1984).

Por lo tanto, aunque el modelo del oscilador autónomo, tal y como está ahora, no explica satisfactoriamente la regulación del ciclo celular en el plasmodio (o de cualquier crecimiento dependiente de la célula), un concepto importante que figuran en éste, el acoplamiento, es decir, los osciladores no lineales, necesita ser probado para su aplicación en determinadas situaciones especiales. Su posible aplicación para explicar fenómenos tales como inhibición del crecimiento por contacto, la asincronía mitótica persistente observada en algunas células multinucleadas ha sido sugerida por Kauffman y Willie (1975). Además, sabemos de los mismos plasmodios de *Physarum* que un sistema de dos capas, compuesto por el endoplasma y ectoplasma (que representa un reloj biológico), su oscilación está asociado con el fenómeno de transporte de transmisión – streaming – protoplásmico (Halvorsrud et al 1993). Esto indica la posibilidad de acomodar un tipo de autonomía en las oscilaciones transitorias bioquímicas en las células, en el marco general de trabajo, incluso de una vía dependiente. De hecho, puede ser bueno para analizar las oscilaciones de la síntesis de la tubulina en los plasmodios desde esta perspectiva. Las tubulinas son los ladrillos que construyen los microtúbulos que junto con el conjunto actina-miosina forman parte del fundamento estructural de nuestro estudio sobre los procesos de *inteligencia adaptativa*.

---

<sup>354</sup> Un ciclo límite es una órbita cerrada y aislada, aunque no lineal.

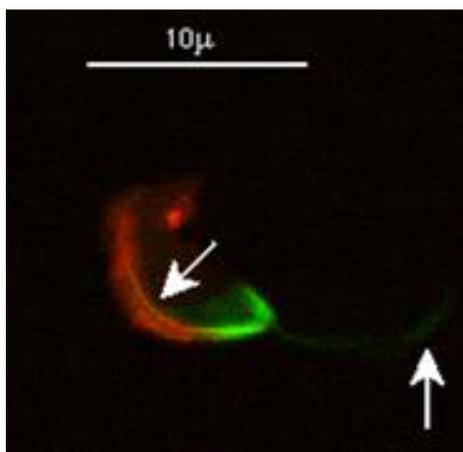


Fig. 32. Microscopia confocal de una ameba *Physarum polycephalum* en el proceso de transformación en una célula de natación flagelado. Doble etiquetado de tubulina (inmunofluorescencia indirecta verde) y actina (rojo, rodamina-faloidina). La flecha que apunta hacia arriba indica flagelo anterior. La flecha que apunta hacia abajo indica aparente colocalización (rojo, verde y amarillo se superponen los rendimientos) de los microtúbulos (MTA 5) y de la actina en la base de la cresta, una proyección plana móviles que se encuentran en la transformación de las células. Imagen inédita por cortesía de Mark R. Adelman (Pagh y Adelman 1988).

La oscilación del flujo de transporte forma parte de los fenómenos más influyentes en el desarrollo de una autonomía fundamental para la supervivencia. De ello depende la nutrición, la motilidad, y la percepción del Umwelt significativo para la permanencia de su existencia. La mayoría de estudios actuales sobre la conducta adaptativa de los mixomicetos y la posible condición de cognición mínima que pueda registrarse en estos organismos depende en alto grado de la capacidad de autooscilar de forma coordinada y por autoinducción – aunque dicha autoinducción sea de naturaleza fisicoquímica.

Es necesario comprender que la capacidad autoinductora de oscilación, de producir sus propios ritmos, de mantenerlos o de recordarlos - en el caso de suprimirlos – requiere de una mejor descripción significativa de las capacidades agenciales requeridas en una causación ascendente de mínimos cognitivos. Su descripción fisicoquímica es necesaria, pero no es suficiente para la explicación de su implicación directa en los comportamientos adaptativos superiores que puedan tener los protistas – sobretodo los mixomicetos – puesto que requieren de un estudio de una interpretación biológica (o biohermeneutica). Esto implica una biosemiótica de primer y segundo nivel (molecular y orgánsmica), que no han sido suficientemente profundizadas, sin que por ello violemos el principio de parsimonia que rige la explicación científica.

El hecho de que el sistema tiene varios patrones y muestra el cambio del comportamiento podrían estar relacionados con el procesamiento de información flexible en el plasmodio. Los plasmodios intactos exhiben patrones espacio-temporals muy complicados y aleatorios cuando buscan alimento (modo de búsqueda). Por el contrario, cuando encuentran comida, el patrón cambia para reflejar la coherencia: las ondas se propagan de manera uniforme sincronizados desde la parte punta, la cual está

en contacto con los alimentos, a la parte contraria. Múltiples patrones y comportamientos de conmutación mostrada por los sistemas de oscilador plasmoidal corresponden a un modo de búsqueda. Una vez que cierta información es ingresada al sistema, el sistema puede elegir uno de los patrones que se refiere a un comportamiento peculiar que corresponde a la información de entrada. Esta característica podría ser ventajoso en la respuesta inmediata a los estímulos locales, sin cambiar su morfología: por lo general, la geometría de red de tubos de los plasmodio cambia de forma dinámica pero lentamente (el cambio requiere muchas horas) cuando cambia el medio ambiente (aplicándole estímulos globales).

Una de las facultades más asombrosas del *Physarum polycephalum* reside en la capacidad de que varios plasmodios puedan fusionarse en uno solo y que un solo plasmodio puede dividirse fácilmente en varios. A pesar de su sencilla estructura, el plasmodio demuestra sofisticadas funciones biológicas. Es decir, un gran grupo de los plasmodios es capaz de comportarse como una sola entidad basada en la información de su entorno. La información obtenida por una entidad local parcial impulsa el comportamiento cooperativo mediante la transmisión de la información a lo largo de todo el conjunto. La información se considera que es procesada a través de la interacción entre los órganos parciales. Esto lleva a, por ejemplo, la conducta atractora del plasmodio hacia los atrayentes como el azúcar, o de escape desde los repelentes respectivamente (Knowles y Carlile, 1978). Estas funciones, transmisión y procesamiento de información, se dice que se realizan a través de los fenómenos oscilatorios intrínsecos en el plasmodio, tales como la oscilación de espesor (Baranowski, 1978), que se sincroniza con el servicio del flujo de transporte del protoplasma, o streaming (Kamiya, 1950), ¿y la oscilación de las concentraciones de ATP (Yoshimoto et al., 1981) y  $Ca^{2+}$ ? (Natsume et al., 1992). Estos fenómenos se suponen que son generados por reacciones mecanoquímicas causadas por complejas interacciones entre las sustancias químicas intracelulares, proteínas, orgánulos, etc (Ueda et al., 1986).

Desde el punto de vista de la dinámica no lineal, por lo tanto, el plasmodio puede ser modelado como un sistema colectivo que consta de osciladores no lineales interconectados con fuerza cierta interacción. En este modelo, un oscilador se puede definir para cada zona parcial del cuerpo del plasmodio, y la interacción entre los osciladores estaría relacionada con la transmisión de protoplasma observado dentro de las estructuras de tubo que interconectan los cuerpos parciales. Por lo tanto, se espera que, mediante el control del patrón de crecimiento y las dimensiones de la estructura de tubo, pudiéramos observar varios tipos de comportamiento colectivo que podría ayudarnos a comprender las características del plasmodio como un sistema dinámico no lineal.

### **El papel de los microtúbulos en la dinámica motriz y en la quimiotaxis**

Por otro lado, en el *Physarum polycephalum* hay una correlación interesante entre la posición del centrosoma y la dirección de la locomoción celular. El centrosoma está

situado entre la punta de conducción del seudópodo y el núcleo. Esto sugiere que la distribución polarizada de los orgánulos en el citoplasma está acoplada espacialmente con polaridad funcional y estructural en la corteza celular. Para estudiar la polarización celular con especial interés en el papel de los microtúbulos, se han analizado los efectos de los reactivos interruptores de los microtúbulos y se irradió con láser local en los comportamientos, tanto del núcleo y el centrosoma en amebas. Las células *Physarum* suelen tener 2-3 seudópodos. Uno de los seudópodos mantiene al tanto que se extiende hasta convertirse en una punta de conducción estable, mientras que el resto se retrae, un paso crucial que reorienta las células durante la locomoción. El núcleo, junto con el centrosoma, específicamente se mueve hacia el seudópodo que se convertirá en la futura punta de conducción.

La corteza celular es el sitio más probable para la interacción de los dos sistemas del citoesqueleto, es decir, los filamentos de actina y los microtúbulos. Los filamentos de actina son el componente principal de la corteza celular, que forma un continuo en una célula. La corteza celular tiene propiedades contráctiles y protrusivas en diferentes localizaciones celulares en función de sus componentes moleculares. El sistema de microtúbulos existe también como una estructura continua en dominios celulares relativamente más profundos. Tiene un patrón de simetría más o menos radial con el centrosoma como un centro focal. La posibilidad de que estos dos sistemas filamentosos hagan una entidad continua en una célula se ha sugerido sobre la base de estudios sobre la ultraestructura, bioquímica, y citomecánica (Ingber 1993). Sobre la base de estos puntos de vista, se especula que un cambio en la actividad móvil de la corteza de un ameba locomotora conduce a la generación de la fuerza que se ejerce sobre los microtúbulos incrustados en la corteza celular. Como un factor adicional, la polimerización y despolimerización de los microtúbulos pueden ejercer la fuerza en los propios microtúbulos

Por contraste, la irradiación en las regiones entre la futura cola y el núcleo no afecta a la migración nuclear. Por inmunofluorescencia, se confirmó la fragmentación de los microtúbulos específicamente en la región irradiada. Estos resultados sugieren que el núcleo se arrastra junto con el centrosoma hacia la futura punta conductora del pseudópodo de una manera dependiente de microtúbulos. Los microtúbulos parecen ejercer la fuerza de tracción generada en la corteza celular en el centrosoma. Pueden servir como un mediador de cambios en la forma iniciados en la corteza celular a la geometría orgánulo en el endoplasma.

Sin embargo, no negamos la presencia de fuerza de empuje. De hecho, la irradiación con láser detrás el núcleo causó inversión transitoria de la migración nuclear a los sitios no irradiados. Otra indicación de la fuerza de empuje es la morfología de los microtúbulos (Fig. 4), que recuerda mucho a los microtúbulos extremadamente curvos observados en algunos tipos de células. Alguna fuerza de compresión en la corteza celular se cree que induce a las curvas.

Como los microtúbulos en estado curvado ahorran mucha energía elástica que los microtúbulos rectos, debido a su rigidez flexible, podrían generar una fuerza que empuja hacia al centrosoma. El balance entre la fuerza de empuje y tracción puede determinar la dirección por donde el centrosoma se moverá.

*Physarum* amebas responden quimiotácticamente a un gradiente de cAMP (Ueda y Ogihara 1994). En la locomoción quimiotáctica de la ameba, los futuros pseudópodos conductores fácilmente se pueden predecir entre los pseudópodos morfológicamente indistinguibles, porque en una célula multipolar el pseudópodo conductor siempre será el que más cerca esté de cualquier otro de una región de mayor concentración de gradiente quimioattractor. Los microtúbulos son los filamentos requeridos para pivotar hacia el quimioattractor.

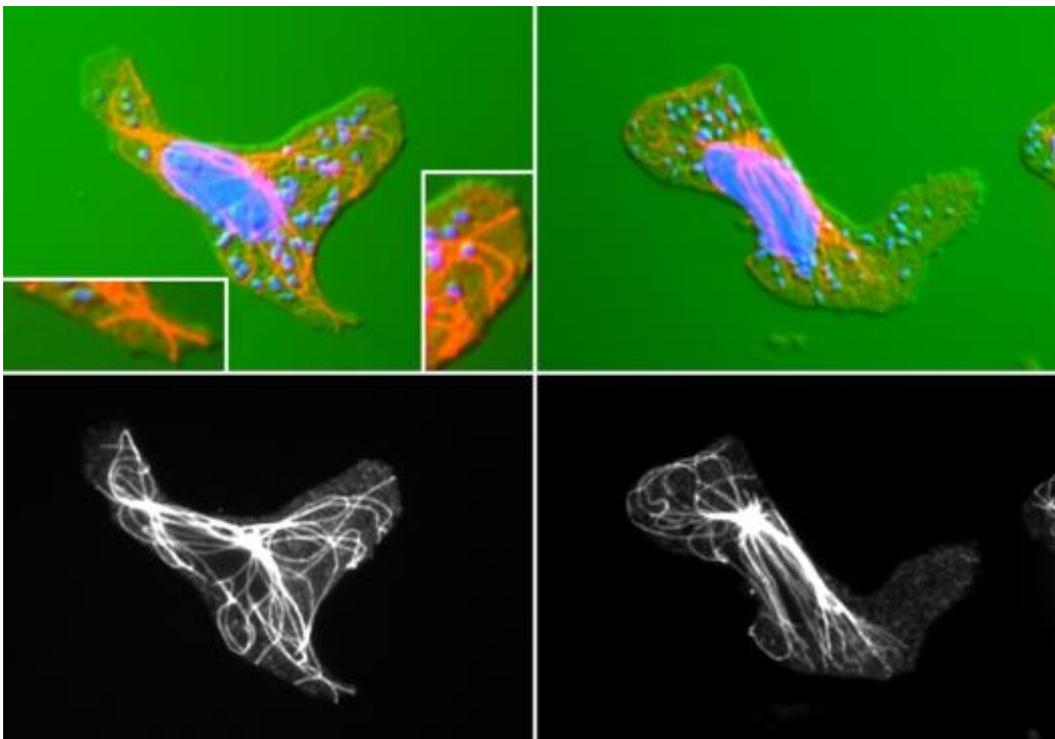


Fig. 33. Localización de los microtúbulos en la migración de las amebas de *Physarum*. Paneles inferiores muestran como los microtúbulos visualizada por inmunofluorescencia indirecta. Los paneles superiores muestran los mismos patrones de los microtúbulos (rojo) se fusionó con imágenes que muestran una tinción de ADN (azul) y Nomarski-DIC (verde) las imágenes de las mismas células. Las inserciones de demostrar que los microtúbulos se extienden a la periferia de la célula. Ueda, M., Kuroiwa, T., Matsunaga, S. and Ogihara, S. (2000): Microtubule-dependent migration of the cell nucleus toward a future leading edge in amoebae of *Physarum polycephalum*. *Protoplasma*, 211:172-182.

### **Integración de la información detectada en la quimiotaxis**

Los organismos en la naturaleza están expuestos a múltiples estímulos a la vez, y sin embargo realizan un comportamiento apropiado. Esto indica que el organismo es capaz no sólo para detectar el estímulo individual, sino también para integrar las múltiples

señales detectadas. ¿Cómo funciona el organismo que responde a una mezcla de estímulos conflictivos de un atrayente y de un repelente? Sorprendentemente, los resultados no son aditivos: la presencia de un atrayente provoca la reacción de evitación del repelente al producirse en concentraciones más altas. Cuantitativamente, si aumenta 10 veces la concentración atrayente entonces se necesita una concentración del repelente 10-veces mayor para una quimiotaxis negativa. Por otro lado, el potencial de membrana responde a las concentraciones similares a las estimuladas únicamente con el repelente. Por lo tanto, los cambios en el umbral de reconocimiento a nivel de comportamiento no se atribuyen a la membrana del receptor, sino del flujo acuoso en la vía de transducción sensorial, es decir, una “integración” (Ueda, 2005). En el siguiente ejemplo el profesor Tetsuo Ueda analiza más a fondo las relaciones estímulo-respuesta, y propone un modelo químico para la integración en términos de unión competitiva. Esta investigación fundamenta la condición de los umbrales de percepción quimiotáctica para la distinción de estímulos externos con la condición de que el organismo toma decisión hacia dónde va a dirigir su búsqueda. Los resultados experimentales obtenidos hasta ahora se resumen de esta forma: Para un solo estímulo, la respuesta de comportamiento R se expresa como una función de la concentración C del estímulo químico externo.

$$R = R_0C / (1+KC)$$

donde, K es la constante que expresa la sensibilidad y es diferente para los diferentes estímulos. La respuesta R puede ser el porcentaje de los organismos que respondieron entre toda la población, y toma valores positivos o negativos para atrayentes y repelentes, respectivamente (Fig. X). Entre los atrayentes son algunos monosacáridos y algunos aminoácidos, y entre los repelentes son las sustancias amargas y los ácidos.

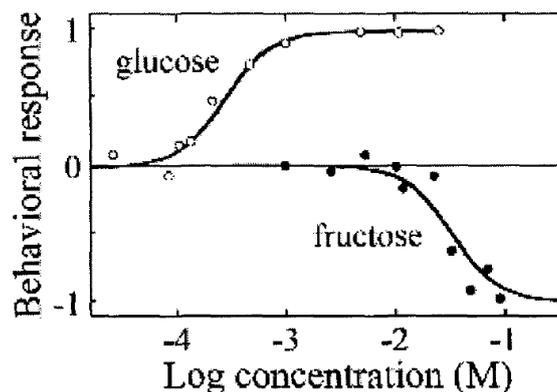


Fig. 34. La respuesta del comportamiento del plasmodio *Physarum* a diversas sustancias químicas. Los datos pueden ser el mejor ajuste con  $R = R_0C^2 / (1 + (KC)^2)$  que con la ecuación anterior.

La relación de estímulo-respuesta para un producto químico tal como expresa la ecuación varía en la presencia del otro producto químico, y vamos entonces a considerar un mecanismo que representa los resultados experimentales. El modelo de Tetsuo Ueda

consiste en tres pasos: (a) la transducción de señales, (b) la integración y (c) enlace en el comportamiento celular, y asume los siguientes.

(a) La transducción de señales a los productos químicos intracelulares: Atrayentes y repelentes induciendo dos tipos diferentes de sustancias intracelulares de señalización, X e Y, respectivamente. Las concentraciones intracelulares se consideran, en aras de la simplicidad, proporcionales a la concentración C externa por encima de los umbrales de la quimiorrepción.

(b) La integración de señales: Tanto X e Y se unen competitivamente con la misma sustancia P. El esquema de reacción es el siguiente:



(c) El enlace para el control del comportamiento: La suma de la fracción de P unido a X e Y es proporcional al comportamiento de la célula, es decir,  $R = PX - PY$  (el signo menos se debe a los taxis negativas). Este modelo se generaliza a cualquier número de estímulos múltiples: La sumatoria de los estímulos externos  $\sum_i C_i$  es transducida a la señal interna  $\sum_i (X_i + Y_i)$  en la membrana del receptor. La señal intracelular X e Y se integra a través de la unión con una sustancia P y la suma de la unión de estado  $\sum_i (PX_i - PY_i)$  controla la maquinaria motriz de tal manera que la suma es proporcional a la respuesta de comportamiento. Nuestro modelo da algunas expresiones cuantitativas para las curvas de estímulo-respuesta cuando el organismo se estimula con un atrayente y un repelente al mismo tiempo. Las respuestas a un solo atrayente, A, y un repelente, B, en una concentración externa C está dada por la siguiente ecuación:

$$R = K_X \cdot (X) / [1 + K_X(X)] = K_{XA}(C_A) / [1 + K_{XA}(C_A)], \quad (2)$$

$$R = K_Y \cdot (Y) / [1 + K_Y(Y)] = K_{YB}(C_B) / [1 + K_{YB}(C_B)], \quad (3)$$

donde los paréntesis indican la concentración, y  $K_X$  y  $K_Y$  son las constantes de equilibrio definidas como

$$K_X = (PX) / [(X) \cdot (P)]; K_Y = (PY) / [(Y) \cdot (P)] \quad (4)$$

La respuesta para una mezcla de un atrayente y un repelente se obtienen de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} R &= P_2/P_0 - P_1/P_0 \\ &= [K_X \cdot (X) - K_Y \cdot (Y)] / [1 + K_X(X) + K_Y(Y)] \\ &= [K_{XA}(C_A) - K_{YB}(C_B)] / [1 + K_{XA}(C_A) + K_{YB}(C_B)], \end{aligned} \quad (5)$$

donde  $P_0$  es la concentración total de la sustancia P. En experimentos de respuesta quimiotáctica por la quinina en presencia de glucosa evidencia empíricamente las predicciones teóricas de la ecuación.

## Capítulo 8. Breve historia del estudio científico de los mixomicetos, partiendo de la historia de la micología.

### Orígenes de la clasificación de los hongos

Históricamente, la primera organización en reinos se debe a Aristóteles hace ya dos mil trescientos años que diferencia todas las entidades vivas de la naturaleza en los reinos animal y vegetal. Su discípulo y peripatético Teofrasto de Eressos (371 – 287 a. C.) quien hizo primero un fabuloso tratado de diez libros recogidos como “*De historia plantarum*” donde recopiló y clasificó de acuerdo a su modo de reproducción, su distribución, su hábito de crecimiento y de acuerdo también a sus aplicaciones prácticas, tales como alimenticias y medicinales; y luego un tratado de ocho libros recogidos como “*De causis plantarum*” donde se estudian las reproducciones, las técnicas de injerto, las afecciones climatológicas, cultivos influencias sobre el crecimiento y las fragancias. Teofrasto distinguió los hongos y las trufas (*μύκης*) de las plantas verdes (Hist. pl. 1.11.1); como un ejemplo de una planta de tallo muy fino (Hist. pl. 1.5.3) entre las plantas que no tienen raíces (Hist. pl. 1.6.5), y como crecen de las raíces de robles o al lado de ellos (Hist. pl. 3.7.6)<sup>355</sup>. En lugar de centrarse en las causas formales, como hizo Aristóteles, Teofrasto propuso un esquema mecanicista, establecer analogías entre los procesos naturales y artificiales, y basándose en el concepto de Aristóteles de la causa eficiente. Ahora bien, el término “*Fungi*” procede del latín fungus, hongo, proveniente del griego *μύκης, ετος* de donde ha recibido la raíz de *μυκος* (mucus)<sup>356</sup>, y era ya empleado por el poeta Horacio<sup>357</sup> y el naturalista y procurador imperial Plinio el Viejo en su “*Naturalis Historia*” (77 dC)<sup>358</sup>. Pero fue el pseudo Aristotélico Nicolás Damasceno (64 a. C. - después del 4 a. C.) en su libro “*De plantis*”<sup>359</sup> que hace mención de los hongos, y sus clasificaciones serán descritas también en el libro primero y cuarto que Alberto Magno escribiría en sus “*De vegetabilis et plantis libri septem*” (ca. 1250)<sup>360</sup>.

<sup>355</sup> Jashemski, W. F, Meyer, F. G., Ricciardi, M. (2002 /1910) *The natural history of Pompeii*. Cambridge University Press, pp.128.

<sup>356</sup> Se entiende que de “moco” proceda la nomenclatura de *moho mucoso* o mucilaginoso para los mixomicetos. En cambio, en otros idiomas la raíz es el vocablo de griego antiguo *σφογγος* (esponja), que hace referencia a las estructuras macroscópicas de mohos y setas; de ésta han derivado los términos alemanes “Schwamm” (esponja), y “Schimmel” (*moho*), el francés champignon y el español “champiñón”.

<sup>357</sup> “(...) *Munere cum fungi propioris censeat amici; Quid possim videt ac novit me valdius ipso.* (...)” Epistola 9ª Ad Claudium Tiberium Neronem. Septimium ei commendat. “*Las Epístolas de Horacio*”. Libro I. En: “*Las Poésías de Horacio*”. Traducido por Javier de Burgos. Tomo IV. (1823) Madrid. p. 108. Aunque el término “fungi” no hace referencia a los hongos, sino el modo gerundivo del verbo “*fungor*” (desempeñar) en genitivo singular masculino.

<sup>358</sup> Aunque Plinio también recoge el término “*boleti*” (HN 16, 3; HN 22, 95) hay otros pasajes que se recoge el término “fungi” (HN 22,96; HN 22, 99). Jashemski, W. F, Meyer, F. G., Ricciardi, M. Opus Cit. pp.128-129.

<sup>359</sup> Aristoteles Semitico-Latinus : *Nicolaus Damascenus De plantis* ; five translations. Edited and introduced by H.J. Drossaart Lulofs and E.L.J. Poortman. Amsterdam : North-Holland Publishing, 1989.

<sup>360</sup> Glick, T. F., Livesey, S. J., Wallis, F. (Eds.) (2005) *Medieval science, technology, and medicine: an encyclopedia*. Routledge Taylor & Francis Group. New York, N. Y.

En el Códice Florentino o *História general de las cosas de la Nueva España*, obra compuesta de doce libros escrita y supervisada por el religioso franciscano Bernardino de Sahagún, entre los años de 1540 y 1585, describe – en los primeros seis libros – los usos y costumbres de determinadas clase de hongos que forman parte importante del uso ritual y enteogénico en la cultura azteca (nahuatl). Actualmente se reconoce el uso de los hongos para estados enteógenos (viajes interiores) en diversas civilizaciones como la griega (con el brebaje de cornezuelo de centeno) la romana y la hindú, aunque este usufructo no forma parte del trabajo de investigación.

Hasta el siglo XVII, los únicos hongos conocidos fueron los llamados *macromicetos* que desarrollan cuerpos fructíferos (setas) visibles, pero gracias a la creación del microscopio por el científico y comerciante neerlandés Anton van Leeuwenhoek (1632 – 1723), se tuvo conocimiento de los hongos microscópicos. Estos organismos adquirieron la categoría de reino y su estudio permitió conocer diversas patologías asociadas a los hongos, determinadas sustancias excretadas por diferentes géneros de organismos fúngicos y el desarrollo de variados antibióticos a partir de ellos.

Carl Nilsson Linneo en su “*Systema Naturae*” (1737)<sup>361</sup> también distinguió estos dos reinos de seres vivos clasificados por Aristóteles, a parte de tratar a los minerales, colocándolos en un tercer reino, Mineralia. Además, introdujo la nomenclatura binomial<sup>362</sup> para referir a las especies y dividió los reinos en filos, los filos en clases, las clases en órdenes, los órdenes en familias, las familias en géneros y los géneros en especies. Desde el reino de la Vegetabilia se ordenaron según el sistema sexual, y se clasificaron por el término “división”. Pero ni en su “*Systema Naturae*”, ni en “*Species Plantarum*” (1737 / 1757 5ª ed.) ni tampoco en “*Genera Plantarum*” (1753) se encuentran el género *fungi*, de donde se tenía mayor conocimiento de las especies macromicetos.

## **Comienzos de la Micología y el descubrimiento de los mixomicetos. Una nueva ciencia: la micología**

El inicio de la era moderna de la micología comienza con Pier Antonio Micheli en 1729 la publicación de “*Nova plantarum genera iuxta Tournefortii methodum disposita*”<sup>363</sup>. Publicado en Florencia, esta obra fundamental sienta las bases de la clasificación sistemática de las gramíneas, musgos y hongos. Fue un paso importante en el

---

<sup>361</sup> Linneo, C. (1735) *Systema Naturae, sive regna tria naturae, systematicis proposita per classes, ordines, genera & species*. Leiden: Theodorum Haak.

<sup>362</sup> La nomenclatura binominal existió antes de Linneo en formas variadas. Pero es a partir de las publicaciones linneanas que se comienza a generalizar la usanza binominal para la nomenclatura específica. El Código Internacional de Nomenclatura Botánica (conocido por sus siglas en inglés, ICBN, en español CINB) es el código actual que responde a las nomenclaturas es el que responde a la regulación de taxones vegetales, incluyendo las algas verdiazules, (Cyanobacteria), los hongos (Fungi) y algunos protistas. La edición actual es el Código de Viena de 17º congreso, en 2005. Y aunque cada código deroga los anteriores se toma como fecha fijada en tanto que inicio de la botánica sistemática en el sentido moderno, la publicación en 1753 del *Species Plantarum* de Linneo. McNeill, J. et al. (2007) *International Code of Botanical Nomenclature (Vienna Code) adopted by the Seventeenth International Botanical Congress Vienna, Austria, July 2005*. Gantner, Ruggell.

<sup>363</sup> Ainsworth, G. C. (1976). *Introduction to the History of Mycology*. Cambridge University Press. p. 4.

conocimiento de los hongos. En este trabajo, que dio la descripción de 1.900 plantas, de los cuales cerca de 1400 fueron descritos por primera vez. Entre éstos se encontraban 900 hongos y líquenes, acompañados por 73 placas. Se incluye información sobre “la plantación, el origen y el crecimiento de hongos, mucoroides, plantas y sus aliados”, y fue el primero en señalar que los hongos tienen órganos reproductivos o esporas. Descubrió las esporas de los hongos, fue una autoridad en criptógamas (vegetales no fanerógamas, como el helecho, el líquen, el musgo, entre otros), y acuñó importantes varios géneros de hongos microscópicos incluyendo los *Lycogala*, *Arcyria*, *Stemonitis*, *Mucilago*, *Aspergillus* y *Botrytis*<sup>364</sup>. El término “micología” y la denominación de “micólogo” se utilizaron por primera vez en 1836 en “*The English Flora of Sir James Edward Smith, Vol. 5*” realizado por el reverendo y padre de la fitopatología Miles Joseph Berkeley (1803, Biggin Hall, Northamptonshire – 1889, Sibbertoft).

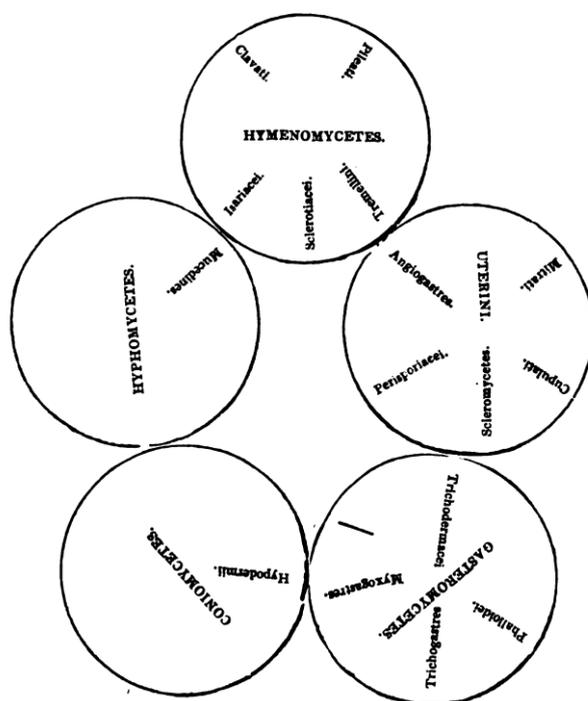


Fig. 35. Diagrama de clasificación de hongos, realizado por el reverendo M. J. Berkeley (1838, p. 98). En la tabla de *Gastromycetes* se encuentran la filo *Myxogastrea* por primera vez.

El reverendo Berkeley fue especialmente famoso como sistematista en micología<sup>365</sup>. Alrededor de 6000 especies de hongos que se atribuye a él. Pero su *Introducción a la Criptógamas Botánica*, publicado en 1857, y sus papeles en vegetales de *Anatomía Patológica de la Crónica de jardinero* en 1854 y en adelante, muestran que había una

<sup>364</sup> *Aspergillus* es un hongo microscópico filamentoso “oportunista” que pertenece al filo Ascomycota. Micheli usó el nombre “*Aspergillum*” por parecerse el hongo al instrumento usado para dispersar agua bendita. *Botrytis* es otro Ascomycota muy frecuente en enfermedades de las cepas de uvas generando plaga e induciendo la muerte celular del hospedador. Ainsworth, G. C. (1976). *Opus Cit.* p. 60.

<sup>365</sup> Berkeley, M. J. (1838) *On the fructification of the pileate and clavate tribes of hymenomycetous fungi*. *Annals of Natural History*. (April) Vol. X, pp 81-101.

Berkeley, M. J. (1836b) *On the existence of a second membrane in asci of fungi*. *Magazine of Zoological and Botany*. Vol.2 pp. 222-225. En: Ainsworth, G. C. (1976). *Opus Cit.* p. 2.

comprensión muy amplia de todo el dominio de la fisiología y la morfología tal y como se entiende en esos días.

## Los estudios de los mixomicetos en el siglo XIX

Por el contrario, los *mixomicetos* o mohos mucilaginosos celulares fueron descubiertos por primera vez hace apenas 190 años. Las primeras clasificaciones de macromicetos y mixomicetos con la clasificación de Linneo fueron realizadas por el botánico y padre de la micología norteamericana, el germano-americano Lewis David de Schweinitz (1780 – 1834). De hecho, Schweinitz (1822; 1832)<sup>366</sup> fue el primero de clasificar a los mixomicetos “Physarum” y nombró también por primera vez al “*Physarum polycephalum*” (Saccardo 1882)<sup>367</sup>, nuestro moho mucilaginoso con el que trataremos de desarrollar nuestra tesis. La razón de esta gran discrepancia es obvia: los mohos mucilaginosos celulares son diminutos y discretos en comparación con champiñones grandes y llamativos. Y hay otros ejemplos de este tipo todas las derivadas del aumento de microscopio en el siglo XIX. Ernst Haeckel<sup>368</sup> en 1866 fue el primero en distinguir entre organismos unicelulares (protistas)<sup>369</sup> y pluricelulares (plantas y animales). Poco a poco se puso de manifiesto la importancia de la distinción entre procariotas y eucariotas y se popularizó la propuesta de Edouard Chatton (1937). Pero el los primeros estudios que verdaderamente influyeron en la comunidad de botánicos – puesto que eran los científicos que recogían en su reino a los mixomicetos – en el siglo XIX fueron los trabajos de Heinrich Anton de Bary, de Christian Ernst Stahl, y los de Wilhelm Friedrich Philipp Pfeffer.

### Heinrich Anton de Bary

Heinrich Anton de Bary (1831, Frankfurt – 1888, Estrasburgo) fue pionero en los estudios sobre los champiñones y las algas, y es considerado el fundador de la micología – subdisciplina botánica que estudia los hongos – y de la fitopatología. En 1853 se recibe de médico en Berlín, mas su "síntesis final de graduación" fue un tratado de Botánica “*De plantarum generatione sexuali*” y publica ese mismo año un libro sobre los champiñones heterobasidiomicetes<sup>370</sup>. De Bary se consagra al estudio biológico de los champiñones. Para esa época,



Heinrich Anton de Bary (1831 – 1888)

<sup>366</sup> Schweinitz, L. D. de. (1822). *Synopsis Fungorum Carolinae Superioris*. edita a D.(sic) F. Schwaegrichen. Soc. nat. cur. Lips. 4:20-132. [Clasificación del *Physarum polycephalum* pág. 37].

Schweinitz, L. D. de. (1832) *Synopsis Fungorum in America Boreali Media Digentium*. Transactions of the American Philosophical Society. Vol. 4, pp. 141-318. [Clasificación del *Physarum polycephalum* pág. 257].

<sup>367</sup> Saccardo, P.A. (1882) *Sylloge Fungorum*. [VII, p. 352; XII, p. 569; XX. p. 401]

<sup>368</sup> Haeckel, E. (1866). *Generelle Morphologie der Organismen*. Berlín: Reimer.

<sup>369</sup> Haeckel introdujo a los mixomicetos en el reino protista por primera vez, distinguiéndolos así de los fungi.

<sup>370</sup> Los basidiomicetos (Basidiomycota) son una división del reino Fungi que incluye los hongos que producen basidios con basidiosporas. Contiene a las clásicas setas y hongos con sombrero.

muchos hongos eran considerados de generación espontánea. Prueba que los champiñones patógenos eran el producto del contenido de células de la planta infectada y que solo podían provenir de otras células ya infectadas. También estudiaría la bacteria *Peronospora infestans* y contribuye a identificar su ciclo de vida, descubierta en 1941 por Miles Joseph Berkeley (1803 – 1889), y la relacionaría con el mildiu<sup>371</sup> en época de la gran hambruna irlandesa, hacia 1850.

Durante mucho tiempo de Bary invirtió sus esfuerzos al estudio de la morfología de los hongos y se dio cuenta que ciertas formas que habían sido clasificadas como especies separadas, eran en realidad las sucesivas etapas del desarrollo del mismo organismo. Es el primero en introducir el término “*Myxomycota*” (o *Mycetozoa*) para englobar los animales inferiores y los mixomicetos (animales fúngicos). En su trabajo sobre los Mixomicetos (1859), fija que tienen una etapa de su ciclo vital, la etapa plasmodial, donde no toman forma determinada, como sustancia, que Félix Dujardin (1801-1860) llamaría *protoplasma*: se trata de una noción fundamental de la teoría protoplasmática de la vida. Aparte, de Bary crea una sección de Micetozoos dudosos para los Plasmodioforomicetos y Labirintulomicetos<sup>372</sup>. En 1864 los denomina “organismos inferiores” (de Bary 1864) y en 1884 escribe: “los hongos mucilaginosos están fuera de los límites del reino vegetal” (de Bary 1884 / 1887). También fue el primero en describir (de Bary 1864) con detalle la germinación de una espora de Mixomiceto. Se ha comprobado (López-Sánchez et al. 1987) que el tiempo requerido para la germinación varía con la especie, edad de la espora, condiciones ambientales, tensión, e incluso con el cuerpo fructífero de cada individualidad. De Bary comprobó la existencia de dos mecanismos principales de germinación en esporas de Mixomicetos (a través de una hendidura y a través de un poro). En definitiva, el trabajo de De Bary ha sido el pilar fundamental donde los micólogos de la talla de Philippe Édouard Léon Van Tieghem (padre de la célula van Tieghem<sup>373</sup>) E. Jahn, y a la Mycological Society of America de la primera mitad del siglo XX (Thomas H. Macbride, G. W. Martin, etc.)

### Christian Ernst Stahl

Christian Ernst Stahl (1848, Schiltigheim, Alsacia – 1919, Jena) fue uno de los más brillantes asistentes de Julius von Sachs<sup>374</sup> en la Universidad de Würzburgo, habiendo servido a su amigo Heinrich Anton de Bary en la Universidad de Halle mientras trabajaba su tesis doctoral. Fue pionero en el estudio de la formación y desarrollo del

---

<sup>371</sup> El mildiu es una enfermedad que afecta a algunas plantas, producida por protistas fungoides Oomycetes de la familia Peronosporaceae. También se le da este nombre al organismo que la produce (Wikipedia®).

<sup>372</sup> Los Plasmodioforomicetos se parecen a los mixomicetos en que ambos tienen células invasoras y un estado plasmodial, considerados como hongos mucilaginosos endoparásitos. Los Labirintulomicetos (hongos mucilaginosos reticulados) y los acrasiomietos (hongos mucilaginosos celulares) tienen algunas características semejantes a los mohos mucilaginosos plasmodiales, pero su estado nutricional (llamado pseudoplasmodio) es diferente.

<sup>373</sup> Las células de van Tieghem permiten observar al microscopio el desarrollo de micelios, o masa de hifas – elementos filamentosos cilíndricos – que constituye el cuerpo vegetativo de un hongo.

<sup>374</sup> Uno de los más grandes botánicos del siglo XIX, asociado particularmente al desarrollo de la fisiología vegetal y al estudio de la morfología de los procesos germinativos.

liquen, sin descuidar los hongos, siendo pionero en la denominada ecofisiología en sus múltiples viajes por Java, Ceilán y México. Estudió la influencia lumínica sobre las plantas, el efecto de la humedad sobre la formación de las hojas y el papel de los estomas.



Christian Ernst Stahl (1848 – 1919)

El trabajo central sobre los mohos mucilaginosos de Christian Ernst Stahl fue publicado en el *Botanische Zeitung* en 1884 con el título de “*Zur Biologie der Myxomyceten*”. Stahl expuso un detallado estudio de los tropismos de los mixomicetos catalogados en ese momento: la influencia de la presencia de agua (hidrotropismo), o de su flujo de corriente (reotropismos), además de la dirección del movimiento de los plasmodios en función de determinadas sustancias químicas (quimiotropismo), o de la influencia de la gravedad (gravitropismo), o de la luz (fototropismo) o del sol (heliotropismo), o del terreno (geotropismo) de la temperatura no isotrópica y del suministro de oxígeno. Biólogos de la talla de Hans

Adolf Eduard Driesch (1867-1941) y Herbert Spencer Jennings (1868 – 1947) fueron entre otros, influenciados por el trabajo de Stahl.

### **Wilhelm Friedrich Philipp Pfeffer**

En el caso del farmacéutico y profesor de botánica Wilhelm Friedrich Philipp Pfeffer (1845, Grebenstein en Kassel – 1920, Leipzig) nuestro interés reside en dos de sus trabajos más trascendentes en la historia de la botánica y de la fisiología vegetal de la segunda mitad del siglo 19. Discípulo de Julius von Sachs (1832-1897) en Würzburg – junto con Stahl, como hemos visto – se convirtió en profesor de farmacología y botánica en la Universidad de Bonn en 1873, en Basilea en 1877, en Tübingen 1878, y en Leipzig en 1887.

La riqueza de investigaciones de Pfeffer es desbordante. Fue pionero de la moderna fisiología vegetal, junto con su maestro Julius von Sachs. Investigó con detalle las diferentes tipologías de nastias o movimientos-respuesta a estímulos externos de las plantas, hongos, mohos y bacterias. De hecho se concentró en la fotostasia (la respuesta a la luz), la quimionastia (respuesta a agentes químicos, pH, actividad del agua, etc.) y a la termonastia (la respuesta a la temperatura). Estableció conexiones entre las nastias y las taxis, sobretudo la quimiotaxis, la fototaxis y la termotaxis que se ofrecen en las células vegetales, mixomicetos



Wilhelm Pfeffer (1845 – 1920)

y bacterias (mixobacterias) (Pfeffer 1888). En dichas comparativas estableció una conexión importantísima entre el estímulo y la intensidad de irritabilidad de las células mencionadas, tomando como fundamento de interconexión la ley de Weber-Fechner para la psicofísica, y que forma parte fundamental del trabajo de investigación que vamos a ir desarrollando. También fue padre de la osmótica, creando la denominada “célula osmótica de Pfeffer” u osmomómetro en 1877<sup>375</sup>, gracias al desarrollo de una membrana semi-porosa

Durante su estancia en Leipzig, Pfeffer publicó un artículo sobre el uso de la fotografía para estudiar el crecimiento de las plantas. Quería aplicar la cronofotografía de Étienne-Jules Marey (1830-1904) – igual que hizo Jakob von Uexküll para los animales marinos – mediante la producción de un cortometraje participación de las etapas de crecimiento de las plantas. Esta "película" se filmó durante un período de semanas en secuencias o “frames” (fotogramas) de exposición tomadas en espacios de intervalos regulares. Más tarde, la fotografía de “time-lapse” o lapso de tiempo se convertiría en un procedimiento común.

### **El descubrimiento del Dictyostelium: Julius Oskar Brefeld**

Uno de los organismos “modelo” que ofrecerá mayores avances tanto en el estudio de la micología, en la historia de la biología (sobretudo molecular y genética) y de la medicina será el género Dictyostelium. En este trabajo lo voy a estudiar como ejemplo de comunicación celular, diferenciación individualizada y altruismo social, y por lo tanto será, junto con el Physarum polycephalum uno de los organismos fundamentales para la descripción de los pilares hacia el concepto de “conducta inteligente”. Fue descubierto en 1869<sup>376</sup> por Julius Oskar Brefeld (1839 – 1925) un botánico, micólogo alemán, aborigen de Telgte, poco después de haberse doctorado mientras era asistente de Heinrich Anton de Bary, en la Universidad de Halle. Al principio Brefeld congeniaría con los trabajos de Anton de Bary, pero años más tarde discrepó de la clasificación sexual de los mixomicetos aplicado por de Bary, argumentando la carencia sexual de los mismos. Aunque sus ideas no fueron del todo acertadas, sus observaciones e ilustraciones eran fantásticas, y sus técnicas de cultivo fueron innovadoras en su tiempo. Describió cerca de cincuenta especies diferentes de Dictyostelia (*purpureum*, *polycephalum*, *discoideum*, *pallidum*, *violaceum*, *minutum*, *lacteum*, etc.) Pero la que Brefeld trabajó con mayor precisión en sus cultivos fue la *Dictyostelium mucoroides*. Muchas de sus características de estos organismos que los investigadores actuales asumen como obvios – la naturaleza fagocitadora de la ameba, la separación de los ciclos de crecimiento y de desarrollo, la ausencia de fusión de células en los agragados – no era tan obvias en su momento. Brefeld examinó la flora fúngica en el estiércol de

---

<sup>375</sup> Perfeccionando el modelo realizado por Dutrochet. Actualmente miden la osmolaridad es decir, la concentración total (medida en osmoles/litro en vez de en moles/litro como se hace en química) de sustancias en disoluciones usadas en medicina. Pfeffer, W. (1921) *Osmotische Untersuchungen*. Wilh. Engelmann, Leipzig 1921. (2., unveränderte Aufl. des Erstdrucks von 1877)

<sup>376</sup> Brefeld, J. O. (1869) *Dictyostelium mucoroides*. *Ein neuer Organismus aus der Verwandtschaft der Myxomyceten*. *Abhandlungen der Schleimpilze*. Untersuchungen aus dem Gesamtgebiet der Mykologie. Vol. 6, 1-34.

caballo, y entonces desarrolló cultivos puros en su laboratorio extraídos del estiércol de conejo. Incluso con este método de cultivo difícil, Brefeld se dio cuenta de que las amebas se mueven de forma trófica (alimentación), y que se agregan para dar lugar a fructificaciones (Kessin 2001). El nombre de *Dictyostelium* proviene del griego “Dictyo” (δικτυο) tejido en red y “stelium” (στελεχος) tallo o tronco, en la observación primero de la agregación en territorios como si fuese una red o tela y posteriormente de la creación de sus cuerpos fructíferos como si fuesen torres. Brefeld agregó el término de *mucoroides* puesto que el nuevo organismo se parece al hongo *Mucor*, aunque Brefeld los



Julius Oskar Brefeld (1839 – 1925)

ubicó taxonómicamente de forma transicional. En 1873, Cienkowski descubrió una forma similar en la *Guttulina* descrita poco después como “rizópodo” incluyendo también la *Vampyrella*, reapareciendo la discusión de la ubicación del nicho taxonómico entre los “mixomicetos” y los “monadineae”<sup>377</sup> Brefeld también informa que el enquistamiento de la myxoameba puede ocurrir en cualquier etapa en el desarrollo del cultivo. Describe el proceso y la germinación de los quistes de forma muy completa, pero no pudo determinar las condiciones que las lleva a cabo. Olive afirma que enquistamiento es provocada por un secado lento. Zopf dice que los microquistes se forman bajo condiciones desfavorables de nutrición (Raper, 1935).

No obstante en la actualidad ha habido controversia para enclavar el género *Dictyostelium* en el filo de moho mucilaginoso como describiremos más adelante. El nombre de *mucoroides* para la especie descubierta por Brefeld no fue un acierto puesto que no tiene los mismos muros esporangios que los hongos, más bien las esporas quedan suspendidas en una gota líquida. A parte Brefeld (1884) determinó correctamente que los muros del tallo y las esporas contienen celulosa.

Philippe Édouard Léon Van Tieghem (1839 - 1914) determinó en 1880, a diferencia de la fusión de los *Physarum polycephalum*, que las células del *Dictyostelium mucoroides* y de otras especies de *Dictyostelia* conservan su individualidad, y en casos adquiriendo un carácter cooperativo en su conjunto. Van Tieghem parece haber sido el primero en distinguir claramente entre el plasmodio agregado y el plasmodio verdadero, y propuso

<sup>377</sup> Protozoo Sarcodina (en época de Brefeld denominado *Proteomyxa*) caracterizado por tener dos tipos de quistes, un zooquiste (formas de resistencia del agente) en el que el organismo se somete a la división en esporas, o en flagelados, o en ameboides; y un esporocisto (vesícula o estructura formadora de esporas cuya pared es la misma que la de la célula) en el se convierte en esporas en reposo o clamidosporas. Rolleston, G., Hatchet Jackson, W. (2002/1888) *Forms of animal life*. Clarendon Press. En: <http://chestofbooks.com/animals/zoology/Life/index.html>

Actualmente el género *Guttulina* (del mismo nombre que la especie) pertenece a la familia *Polymorphinidae*, del orden *Legenida*, de filo foraminíferos y de subreino *Rhizaria* (Cavalier-Smith 2002)

que había cuatro grupos distintos involucrados de mixomicetos propiamente dichos es decir, la *Endosporeae*; *Dictyostelium* y sus familiares, para lo cual propuso el nombre *Acrasieae*; un tercer grupo representado por *Ceratiomyxa* y probablemente un cuarto representado por *Plasmodiophora*. En su estudio más detallado de dos miembros de la *Acrasieae*, Brefeld (1884) reconoce distinciones van Tieghem, entre el plasmodio agregado de estas formas y un plasmodio verdadero, aunque no se refiere al artículo de Van Tieghem. Su término, *pseudoplasmodio*, ha sido generalmente adoptado para la masa de amebas unidas pero no fusionados.

### **Kenneth Bryan Raper**

Pero no sería hasta 1935 que gracias al trabajo de Kenneth Bryan Raper (1908– 1987) se identificaría un nuevo *Dictyostelium* que llegaría a ser el organismo modelo para múltiples estudios del comportamiento cooperativo y del altruismo celular, entre otras investigaciones puntuales en el ámbito de la genética: *el Dictyostelium discoideum*. De hecho el profesor H. A. Harper – pionero en el estudio de la morfogénesis del *Dictyostelium* del Departamento de Botánica de la Universidad de Columbia – fue quien engrescó a un joven Raper para que fuese el primero en aislarlo, obteniendo al año siguiente su doctorado en la Universidad de Harvard. El *D. discoideum* proviene de los frondosos bosques de Little Butt's Gap, a las afueras de Ashville, del Norte de California (Raper 1935, Kessin 2001). Esta cepa, que ahora se llama NC4 y sus descendientes (con idénticos patrones de RFLP), todavía se puede aislar de aquel lugar. La especie, aunque se pueda recuperar en todo el mundo, no es el más común de la *Dictyosteliida*. Raper había recuperado *D. discoideum* y otras especies de muestras de suelo, mientras que anteriormente los organismos se habían recuperado de los excrementos. *D. discoideum* posee una serie de características singulares. Como micólogo, Raper comenzó su carrera profesional en el USDA – Departamento de Agricultura de los Estados Unidos –, en primer lugar en la Oficina de Química y Suelos (1929-1936) y luego en la Oficina de Industria de Plantas, de 1936 a 1940. Allí se encontró con el Dr. Charles Thom<sup>378</sup> que se convirtió en su mentor y colaborador clave



**Kenneth Bryan Raper (1908-1987)**

<sup>378</sup> Charles Thom (1872-1956) fue un micólogo cuyo trabajo en la microbiología de los productos lácteos y los hongos del suelo fue una influencia importante en el establecimiento de normas rigurosas en el manejo de alimentos y procesamiento en los Estados Unidos. Sus investigaciones sobre la taxonomía de *Aspergillus* y *Penicillium*, además de la construcción de una recopilación sistemática de cultivos vivos de los mohos mucilaginosos, y la correcta identificación de *Penicillium notatum* como productor de la penicilina por Alexander Fleming, forman un núcleo de estudios de gran envergadura, que en última instancia condujo a una vasta producción de antibióticos. Fuente: The New York Botanical Garden. International Plant Science Center. Mertz Library.

en su obra. En 1940 Raper y Thom publicaron sus estudios sobre las capacidades del *Dictyostelium*. Hubo una serie de conclusiones interesantes de desarrollo – el primero se refiere a la proporcionalidad, que se mantuvo más de una variedad de tamaños de agregados y babosas (Raper 1940b). No importa cuál sea el tamaño del agregado o la babosa que se formó de él, la proporción de las esporas siempre fue del 80%, mientras que el restante 20% forma el tallo. Raper fue el primero en reconocer que el problema de la proporcionalidad es un tema crítico en el desarrollo de *Dictyostelium*. Pero ¿cuáles fueron los precursores de las esporas y el tallo de las células? ¿Hay regiones determinadas de la babosa para dar lugar a las esporas o hay una población mixta? Hoy en día tenemos a nuestra disposición todo tipo de cepas que expresan el marcador de  $\beta$ -galactosidasa o la proteína fluorescente verde, pero Raper no tenía ninguno de estos y resolvió el problema por el crecimiento de la ameba a través de la especie *Serratia marcesans*, que es de color rojo. El pigmento de *Serratia* no es degradada por las amebas y los agregados resultantes, las babosas y los cuerpos de fructificación son de color rojo. En una elegante serie de experimentos de trasplante, Raper mostró que en el frente de las babosas se da origen al tallo y la parte trasera a las esporas.

El pseudoplasmodio ha demostrado ser polarizado y controlado por sus extremos. Más experimentos mostraron que extremos recientes reclutan células de una babosa y controlan su destino, al igual que un organizador embrionario. Cuando los extremos se trasplantan a una babosa, una serie de pequeñas babosas surgen, migrando todas hacia la formación de cuerpos fructíferos. Este resultado plantea la posibilidad de que una sustancia es segregada por una punta para el control de las células de la parte posterior. Una variante de la cuestión nos lleva a preguntarnos por qué cada babosa tiene sólo un extremo o punta, ¿por qué no forman extremos en todas partes? No sólo hay una actividad de contratación en la punta, sino también una actividad que suprime la formación de punta secundaria.

### **Arthur Arndt y John Tyler Bonner**

Uno de los primeros investigadores que reconoció la naturaleza del desarrollo embriológico del mixomiceto llamado *Dictyostelium mucoroides* fue Arthur Arndt. Hubo un período de inactividad en Europa que abarcó las décadas antes y después de la Primera Guerra Mundial, cuando sólo unos pocos estudios se han podido publicar; Arndt fue uno de ellos.

A principios de 1930 Arndt<sup>379</sup> realizó películas de la agregación de amebas y se percató de su interesante desarrollo. La hipótesis de señalización transmitida por pulsos tuvo la virtud de que explicaba el movimiento de las células en intervalos de tiempo. A través de películas realizadas por Arthur Arndt en la década de 1930, éste explica y muestra los anillos de agregación de las células observadas posteriormente por el doctorando John Tyler Bonner.

---

<sup>379</sup> Arndt, A. (1929) *Die Entwicklung von Dictyostelium mucoroides*. Institute of Hygiene, University of Rostock. (A film.)

Bonner (2002, p. 96) guardó una de las películas de Arndt. Al establecerse en Princeton, éste coincidió con su amigo y filósofo de la ciencia Paul Oppenheim. Este se mostró muy interesado por los hallazgos realizados por Arndt y, registrados en el film. Tal fue el interés de Oppenheim que fue a comentárselo a su amigo Albert Einstein. Bonner recibió un mensaje del propio Einstein pidiéndole que pudiera visionarla y Bonner se la llevó. Einstein se mostró muy interesado en el problema del desarrollo.

La historia de la señal de retransmisión se remonta a un estudio pionero de los intervalos de tiempo o “time-lapse” registrados por Arthur Arndt en su artículo póstumo *Rhyzopostudien III* en 1937<sup>380</sup>, (el primero sobre todo el desarrollo de un organismo pluricelular), que descubrió la actividad pulsátil de los centros de totalización y la propagación de los estímulos de forma ondulatoria (Gerish, Ecke 2005).

La señalización por pulsos tiene una ventaja en el coste de la energía. Si cada señal debe ser mayor que la última para mantener un gradiente, las células deberán de consumir grandes cantidades de ATP en la síntesis de AMPc<sup>381</sup>. Existen también otras necesidades de las células que se trasladan hacia el interior de forma periódica después de su transmisión de señales – se dieron cuenta de que tenía que ser refractaria a las señales celulares de vuelta. Su meticulosa experimentación condujo a una teoría elegante, que ha demostrado ser esencialmente correcta.

La teoría de transmisión predecía a la de la existencia de un ritmo marcador, constituido por un grupo de células en el centro del agregado. Todavía no sabemos la razón por la que se producen las señales en un cierto período de tiempo - inicialmente unos 6 minutos en el *Dictyostelium mucoroides*.

Las películas de intervalos de tiempo realizadas por Arthur Arndt pusieron de manifiesto, hace más de 70 años, que el flujo de las células hacia los centros de agregación es con frecuencia periódica, y que la excitación puede propagarse en ondas desde un centro hacia la periferia de un territorio de agregación (Booner 2002, p. 96).

Arndt dijo que el ciclo de vida de esos hongos mucilaginosos era tan increíble que cualquier descripción materialista de la cuestión no parecía completar la explicación,

---

<sup>380</sup> Arndt, A. (1937) *Rhizopodenstudien. III. Untersuchungen über Dictyostelium mucoroides*. Brefeld. Wilhelm Roux 'Archiv für Entwicklungsmechanik der Organismen, 1936. Published in: *Development Genes and Evolution*. 1937, Volume 136, Number 5, pp. 681-744. Después de la muerte del Arthur Arndt, se imprimió este magnífico estudio gracias a Elisabeth Arndt y el profesor Adolf Meyer-Abich. Aunque el capítulo sobre “la estructura del núcleo y la división celular” del *Dictyostelium mucoroides* se pretendió publicarlo aparte, por razones presupuestarias de la editorial. Lo cierto es que he investigado si existe dicho artículo y hasta la fecha no he encontrado registro alguno de él. De hecho hasta el momento no he tenido éxito en saber más sobre este magnífico biólogo, salvo los dos artículos citados, la biografía de John Tyler Bonner (2002) y de Jakob von Uexküll (1940/1942) *Bedeutungslehre*. En castellano “Teoría de la Significación”. (Nota del autor).

<sup>381</sup> El AMP cíclico (AMPc) es el agente quimiotáctico de la agregación de células de *Dictyostelium discoideum*, que no sería descubierto hasta 1956 cuando Sutherland y sus colegas tratan de explicar el efecto de la epinefrina sobre una degradación de glicógeno en células hepáticas. En 1967 el AMPc fue llevado a un número de procesos y sus efectos quimiotácticos fueron probados en el laboratorio de John Bonner. Kessin, R. H., Franke, J., *Dictyostelium: evolution, cell biology, and the development of multicellularity*. Cambridge University Press, 2001. Pág 18

sino que sólo puede ser explicado por alguna fuerza vital. No hay indicios de esto en el artículo de Arndt en 1937 sobre el organismo, pero al parecer no tuvo limitaciones en una conferencia<sup>382</sup>.

El padre de la Biosemiótica, el biólogo Jakob von Uexküll expone en su obra “Teoría del Significado (1940/1942) los descubrimientos del profesor Arndt:

*“Los gérmenes del mixomiceto se hallan formados primitivamente de amebas en movimiento libre que se ocupan de alimentarse de la flora bacteriana, sin molestarse la una con la otra. Después se multiplican las amebas por división. Cuanto mayor sea la alimentación, con mayor rapidez se multiplican. Esto tiene como consecuencia que la alimentación se agote en todas partes al mismo tiempo.*

*Pero después acontece lo más asombroso: todas las amebas se separan una de la otra en distintos proporcionados, y dentro de cada uno de ellos, todas las amebas se encaminan hacia el punto medio común. Llegadas allí se arrastran penosamente una sobre otra hacia el punto más alto, en el cual las que han llegado primero se transforman en sólidos sostenes celulares, que sirven de conductor a las que llegan después. Inmediatamente que ha sido alcanzada la altura definitiva del tallo capilar, se transforman las células llegadas últimamente en el organismo del embrión, cuyas cápsulas semillíferas contienen semillas vivas. Las cápsulas semillíferas son dispersadas por el viento y trasplantadas a nuevos lugares de pasto. (...) La demostración de Arndt es también especialmente importante porque se trata en este caso de un ser vivo que en el primer periodo de su existencia actúa como un animal, y en el segundo, en cambio como un vegetal” (Uexküll 1940 / 1942, pp. 38-39).*

Como bien dice Uexküll, en la descripción del ciclo vital del Dictyostelium, se describen dos periodos diferenciados que llegaremos a profundizar más adelante, pero que son descritos como procesos del reino animal y del reino vegetal respectivamente. Lo cierto es que hasta en la actualidad ha habido discrepancias de la clasificación taxonómica de los mixomicetos. Las razones actuales no son de comportamiento, sino genéticas (ARN Ribosómico). La síntesis de la proteína del factor de elongación-1 $\alpha$  (EF-1 $\alpha$ ), por ejemplo, parece ser muy adecuado para la filogenia de nivel profundo, debido a su lento ritmo de la evolución de la secuencia; al igual que el análisis de la actina y de la  $\alpha$  y  $\beta$ -tubulina, factores identificadores de suma importancia para los fundamentos de nuestro estudio del comportamiento adaptativo hacia una primigenia inteligencia.

Recordemos que en los inicios de nuestra era, los organismos que poseían características externas de animales y plantas comenzaron a denominarse *zoofitos* (latín singular: zoophytum; plural: zoophyta). Esta denominación habría surgido por primera vez en el siglo IV (ca. 350 d. C.) en la escuela neoplatónica siria. Dexipo, discípulo de

---

<sup>382</sup> Bonner, J. T., Op. Cit. p. 96.

Jámblico de Calcis, escribió: “La naturaleza no pasa directamente entre categorías, como por ejemplo entre animales y plantas, sino que ella tiene que idear un tipo de vida intermedia, tal como los zoofitos que unen ambos extremos y completan así ambas categorías”(Osorio 2007)<sup>383</sup>.

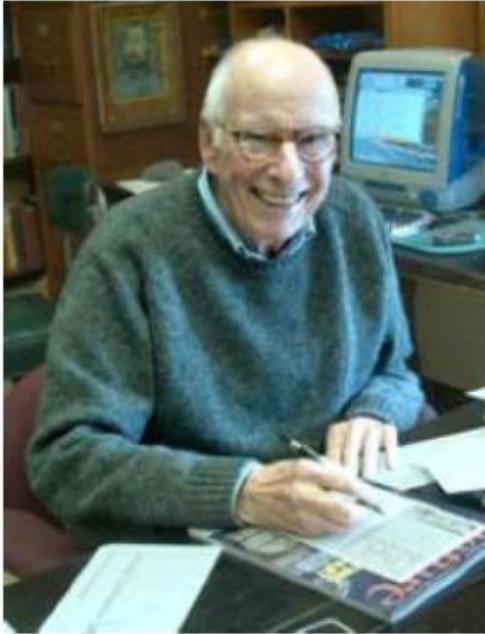
Actualmente se mantiene que los mixomicetos tienen un acercamiento mayor al clado animal-fungi que la de plantas verdes (Baldauf y Doolittle 1997), englobados en el supergrupo *Amebozoa* con el taxón de *Conosea* - amebas que por lo general poseen etapas flageladas o ameboflageladas - descrito por el eminente protozoólogo Thomas Cavalier-Smith (Minge, Silberman, Orr, Cavalier-Smith, Shalchian-Tabrizi, Burki, Skjæveland, Jakobsen 2009; Cavalier-Smith, Chao, Oates, 2004). Por otra parte, estos resultados apoyan el uso continuado de los taxones de *micetozoos* como sistemas modelo para estudiar el origen, evolución y funcionamiento de una amplia gama de características de eucariotas “superiores”. Por eso conjeturo en este trabajo que el comportamiento animal –como nos recuerda Uexküll - de los mixomicetos tiene semejanzas, o como yo lo defino “equivalentes homeomórficos” con comportamientos de células eucariotas de animales superiores como pueden ser determinadas glías (sobretudo microglías), hematocitos, y demás células de carácter inmunológico. Sus ligandos filogenéticos a través de la  $\beta$ -tubulina, por ejemplo, nos induce a suponer un carácter específico de morfogénesis con parentesco ancestral en los mixomicetos.

A su vez, los caracteres ontogenéticos que generan la gran parte del comportamiento adaptativo a nivel unicelular o pluricelular, son fruto de desarrollos filogenéticos en los que quedan descritas las clasificaciones taxonómicas.

---

<sup>383</sup> Aunque el concepto de zoofito está en desuso configura el concepto de la complejidad taxonómica que se encuentran los mixomicetos. Osorio explica que “Aristóteles, en su obra *Historia Animalium*, expresa claramente lo que luego se denominó *Scala Naturae* o Gran Cadena de los Seres (*échelle des êtres*). ‘La naturaleza avanza poco a poco desde lo inanimado hasta la vida animal, de una manera que es imposible determinar exactamente, cuál es el límite de demarcación, ni a qué grupo podrían pertenecer las formas intermedias’. Aún así, esto no le impidió al gran Estagirita describir a algunas de estas formas intermedias, llamadas por él *Ostrakodermos*, más conocidos por su nombre latino de *Testacea* (actuales bivalvos, caracoles, erizos de mar, etc), dentro de los animales”. Curiosamente Uexküll fue especialista en estos animales invertebrados para su estudio de los movimientos reflejos (*Rückbeugung*) (Beer, Bethe, Uexküll 1899; Uexküll 1894; Uexküll 1904a; Uexküll 1904b; Uexküll 1907) de los que también tiene clasificación los animales sin sistema nervioso como los infusorios – a los que se les atribuye como *zoofitos* por van Leeuwenhoek – y de los que Uexküll estudió tanto en amebas, como en paramecios y en mixomicetos el denominado “Umwelt” y el “Innenwelt” protoplasmático (Uexküll 1909).

La descripción de *Dexipo* – en el artículo de Osorio – proviene de la traducción al inglés del profesor John Myles Dillon de la obra de *Dexipo*: Dillon J. (1990). *Dexippus on Aristotle's categories*. Cornell University Press. p. 90. Nota 51.



John Tyler Bonner (1920 – )

John Tyler Bonner estuvo trabajando como pregraduado desde 1940 en la Universidad de Harvard, interrumpiendo sus estudios de graduación por su intervención en la Segunda Guerra Mundial, presentando en 1947 su tesis doctoral sobre el factor quimiotáctico de agregación de los mohos mucilaginosos de la familia *Acrasieae* – que denominaremos a partir de ahora Acrasia. El compuesto químico desconocido que Bonner descubre en sus observaciones de asimetrías de migración orientada hacia un punto concreto, después de un paseo sin rumbo aparente. Bonner quiso reproducir matemáticamente las trayectorias de estas concentraciones de pseudoplasmodios. Al compuesto químico atractor le denominó “acrasin”. No será hasta 1967 que Bonner y David Barkley se dieron cuenta el compuesto

quimioattractor que permite reunificar las células del *Dictyostelium discoideum* en un tipo de babosa es lo que el profesor Earl Sutherland de la Universidad de Vanderbilt denominaría adenosín monofosfato cíclico (AMPC). Sutherland aisló en 1956 el AMPC al tratar de explicar el efecto de la epinefrina sobre una degradación de glicógeno en células hepáticas. El AMPC es un enlace clave para la célula entre la recepción de un mensaje desde una hormona y las moléculas informativas dentro de la misma. Por esta razón Sutherland la llamó “segundo mensajero”, siendo el descubrimiento con el que consiguió el premio Nobel. Bonner facultó desde 1947 en la Universidad de Princeton y hasta la actualidad (más de noventa años) sigue describiendo de una forma magnífica los rasgos tan peculiares que adoptan la conducta de los *Dictyostelium discoideum*. “El mundo vivo está hecho de ciclos de vida” – dice Bonner – es más “todos los organismos vivos son ciclos de vida, y que la evolución por la selección natural es la que controla la naturaleza de dichos ciclos”<sup>384</sup>. Bonner fue capaz de captar las similitudes entre la conducta y el desarrollo. Ambos se asemejan en que están de alguna forma separados de los procesos que envuelven el estricto control genético. Mientras que en el desarrollo todas las células teniendo los mismos genes pueden diferenciarse en sus diversas especializaciones morfológicas y fisiológicas, en la conducta pasa que algunas acciones pueden provenir de la constitución genética, mientras que otras son fruto del aprendizaje, siendo entonces éstas reordenadas desde los genes. Aunque entre el gen productivo inicial y el efecto final hay muchos pasos, así como los genes que afectan a la conducta.

Bonner (1988), en su libro sobre la evolución de la complejidad sugiere que la complejidad biológica (y por extensión la complejidad social) también debe definirse en función de la naturaleza funcional de los sistemas vivos. Lo más sobresaliente acerca de

---

<sup>384</sup> Bonner, J. T., Op. Cit. p. 158.

los sistemas biológicos no es sólo el número de piezas, o incluso el número de interconexiones entre las partes, Bonner sostiene, que la división del trabajo (y la combinación de capacidades) que dan lugar, son las notas distintivas de la diversidad biológica complejidad. En otras palabras, la complejidad biológica debe estar asociada entonces con las sinergias funcionales que se producen. Bonner reconoce que en la adhesión multicelular del *Dictyostelium discoideum* hay un comportamiento que va más allá del comportamiento adaptativo. Las células individuales son atraídas por el AMP cíclico de ellas mismas para generar un centro agregador hasta formar una especie de babosa pseudoplasmodica. Ahora bien, aún no se sabe con certeza por qué algunas células del *Dictyostelium* actúan de forma altruista para generar el cuerpo fructífero.

Algo semejante ocurre también en el auténtico plasmodio *Physarum polycephalum*. Generan cuerpos fructíferos donde generan cápsulas semillíferas que liberaran sus esporas al aire para así volver a realizar el ciclo vital. Bonner reconoce que también son capaces de buscar valores óptimos y escoger su alimento necesario por sus proporciones óptimas de carbohidratos y proteínas, igual que en animales superiores dotado de glándulas y sistemas nerviosos (Booner 2010). ¿Podemos tomar la capacidad de “seleccionar” y “buscar valores óptimos” como un aspectos cognitivos que confiere decisión en pro de la mejor opción para la supervivencia?

#### **Los primeros estudios del *Physarum polycephalum*: Frank Leslie Howard**

Ahora bien, el primer estudio histórico del moho mucilaginoso *Physarum polycephalum*, con el que nos vamos a centrar en nuestra investigación, fue llevado a cabo por el micólogo, y profesor emérito de fitopatología en la Universidad de Rhode Island, Frank Leslie Howard (1903 – 1997). El trabajo desarrollado por Howard en 1930 en la Universidad de Iowa va más allá de la taxonomía y de la citología de estos mohos mucilaginosos que van a ser el centro de atención en los próximos estudios sobre el comportamiento y la cognición. La investigación en la tesis doctoral del Dr. Howard (1931a) – dirigida por G. W. Martin – se centra en el estudio del ciclo de vida de *Physarum polycephalum*. Gracias a su trabajo (Howard 1931b), se reconoció la necesidad de incrementar las investigaciones en torno al mixomiceto plasmodio en el laboratorio para estudiar con éxito el ciclo de vida del *Physarum polycephalum* de esporas a esporas, y de este modo investigar los procesos de desarrollo en distintas fases del ciclo. Sobre la base de su propia experiencia y la de otros investigadores, desarrolló el método de agar con cultivos planos con láminas de avena que es actualmente utilizado.



Frank L. Howard

Howard fue el primero en resolver con éxito la cuestión de si la mitosis se produce en el plasmodio. En un artículo clásico (1932), demostró de manera concluyente que (1) las divisiones mitóticas en plasmodios son esencialmente sincrónicas, (2) que se producen

en algunas partes sólo en crecimiento activo del plasmodio, y (3) son de corta duración. También demostró de manera concluyente que el aumento en el número de núcleos en el plasmodio es geométrico en lugar de aritmético. Su trabajo eliminó la especulación acerca de un proceso conocido como amitosis<sup>385</sup> como la posible explicación para el aumento del número nuclear en rápido crecimiento plasmodios. Todo esto se llevó a cabo con las técnicas convencionales citológica disponible en el momento, que exigía sacrificio y fijación del material biológico a intervalos predeterminados durante todo el día para hacer frente a la cuestión del lugar y la frecuencia del proceso mitótico. Sus primeros trabajos no sólo fue un modelo de esfuerzo diligente y perseverancia, sino también de la perspicacia de un sistema biológico complejo.

### William E. Seifriz

El Dr. William Seifriz de la Universidad de Pennsylvania fue uno de los primeros biólogos que trabajaron con el *Physarum polycephalum* después de los exitosos cultivos realizados por el Dr. Frank Leslie Howard. Desde sus días de estudiante en la Universidad Johns Hopkins y en Inglaterra, Alemania, Suiza y Francia, William Seifriz anhelaba tener abundante suministro de dichos “protoplasmas desnudos”. El plasmodio *Physarum polycephalum* cumplía con sus propósitos de investigación: el estudio del protoplasma (Seifriz 1931; 1936; 1938).



William E. Seifriz (1888 – 1955)

El *Physarum* produce “cuerpos fructíferos” a intervalos de un promedio de 14 días (al final de la cual se convierte en células duras, o semilleros), que está formalmente clasificado como una planta, reivindicando su condición como botánico. Sin embargo, Seifriz observó que los nuevos frutos pequeños, los bloques de protoplasma, tenían facultades de locomoción como un animal. Se mueven por el método clásico de flujo protoplásmico o “streaming” (Seifriz 1943b) que resalta parte de su cuerpo, arrastrando al resto después del saliente.

De este flujo o “streaming” protoplasmático, Seifriz se interesó muchísimo. Los movimientos de *Physarum* muestra el resultado de un impulso definitivo, no muy

---

<sup>385</sup> La amitosis es un tipo de reproducción asexual que se da en los animales unicelulares. En este tipo de reproducción el organismo se divide en dos y cada célula resultante tiene las mismas características genéticas de la célula madre. Hay tres tipos de amitosis: fisión binaria o bipartición, gemación y esporulación. La fisión binaria es un tipo de reproducción celular por medio de la cual una célula se divide en dos partes iguales estas se separan de la madre formando un núcleo propio y transformándose en otros organismos mas pequeños pero genéticamente idénticos a la madre. Es característico de organismos procariontes como las bacterias. La gemación forma una protuberancia o yema en la pared de la célula madre. Estas pequeñas protuberancias crecen llevándose a la vez una parte del núcleo y del citoplasma de la célula madre. Finalmente se desprenden y forman nuevos organismos. Ej.: la levadura. Y la esporulación es el tercer tipo de amitosis y se da cuando el núcleo de una célula se divide en muchas partes pequeñas. Estas se cubren con citoplasma formando esporas que pueden permanecer latentes cuando se presentan condiciones adversas. Cuando las condiciones son adecuadas o para su desarrollo, se dividen formando nuevas organismos con la misma información genética.

diferente a la de un corazón que late. Con equipo inadecuado de imágenes en movimiento en Filadelfia, no fue capaz de ver este ritmo de vida hasta que fue a estudiarlo en el Instituto Pasteur de Francia, donde las películas se han realizado ralentizando la secuencia de frames hasta 100 veces. El pulso del *Physarum* se considera que tiene un período aproximado de 45 segundos. Dr. Seifriz rechaza las anteriores teorías que atribuían el movimiento protoplasmático a la tensión superficial, potenciales eléctricos, etc. “Pido al lector” – escribió en *Science* (Seifriz 1938, Burr y Seifriz 1955) – “simplemente que admita que *el protoplasma está vivo*, porque al hacerlo, se concede tácitamente que *se presenta irritabilidad*, en otras palabras, *una respuesta nerviosa*”<sup>386</sup>.

Para el Dr. Seifriz este moho mucilaginoso es la forma de vida inferior modélico. Las bacterias son más pequeñas que las células del moho, pero su pretensión de primitivismo superlativo era “cuestionable” y según Seifriz son más difíciles de estudiar. Las amebas son también simples pedacitos de protoplasma, pero tienen algo que carece el *Physarum*: una vacuola contráctil (cavidad), que arroja a chorros los fluidos del cuerpo hacia el exterior.

Para Seifriz, como filósofo de la ciencia (Seifriz 1939, 1943a), aparte de botánico consumado, le preocupaba ubicar la vida dentro de un materialismo coherente con los principios metodológicos de la ciencia. La observación de la respiración en los organismos vivos, y la aparente quiescencia respiratoria en el estadio esclerocio del protoplasma del *Physarum polycephalum* fue uno de los caballos de batalla en busca de una respuesta bioquímica de los cambios de fase sin pérdida de propiedades tanto fisiológicas como morfológicas del moho mucilaginoso.

Los estudios de Seifriz sobre los efectos anestésicos en el protoplasma del *Physarum polycephalum*, tiene repercusiones de gran importancia para la determinación de la sensibilidad – irritabilidad en el moho mucilaginoso, y su relación con el “streaming” protoplasmático. Entre las conclusiones que podemos adelantar, es que el plasmodio tiene un comportamiento de flujo no newtoniano (Seifriz 1936). Esto quiere decir que su viscosidad varía con la temperatura y la tensión cortante que se le aplica, de acuerdo con aspectos coloidales que tiene el protoplasma. A parte, determinadas propiedades reológicas que tienen que ver con la relación entre el esfuerzo y los tensores de tensiones bajo diferentes condiciones de flujo, tales como condiciones de esfuerzo cortante oscilatorio se hacen patentes en el “streaming”. Veremos si dichos comportamientos reológicos del protoplasma tienen relación directa con el comportamiento semejante a un sistema nervioso y si sus actuaciones son cuantificables y cualificables.

Los trabajos relacionados con el “streaming” o flujo de corriente del protoplasma de Seifriz, fueron realizados con la colaboración del profesor Noburô Kamiya (Seifriz y Kamiya 1940; Kamiya, 1942; Kamiya y Seifriz 1954).

---

<sup>386</sup> Las cursivas son mías.

## Noburô Kamiya y el pulso de protoplasma

La puerta más obvia a los misterios centrales de la vida es el protoplasma, la materia básica de las células vivas. Una característica interesante de todo protoplasma es el llamado "streaming", un flujo de corriente semejante a la gelatina líquida. Desde hace algunos años el Dr. William Seifriz, profesor de botánica en la Universidad de Pensilvania, ha estado al moho mucilaginoso dorado *Physarum polycephalum*, considerado en su momento como una de las formas más elementales de la vida. En su streaming o flujo se ha registrado un ritmo que supera los 45 segundos (Time, 06 de diciembre 1937). Como si fuese un latido primordial, este pulso puede ser el antepasado de todos los latidos del corazón real.



*Noburô Kamiya*

Noburô Kamiya (1913 – 1999)

En 1939 en el laboratorio del Dr. Seifriz “se dejó caer” discretamente un científico japonés de 27 años de edad, de presencia frágil pero gracioso a su vez: Noburô Kamiya. Este joven talento hizo un trabajo de postgrado en Botánica en la Universidad Imperial de Tokio, estaba estudiando en Giessen en Alemania en el fatídico verano de 1939. Cuando Alemania invadió Polonia, el gobierno japonés ordenó a Kamiya salir. No se detuvo para los libros o la ropa, salió de prisa de los EE.UU. a través de Hamburgo y de Bergen. Él escribió al Dr. Seifriz, preguntando si podía ir a trabajar en su laboratorio. Seifriz le dio la bienvenida. “Lo primero que hice – recuerda Seifriz – fue prestarle un impermeable”. Kamiya lo guardó toda su vida.

Cuando Kamiya había visto con sus propios ojos el latido rítmico de *Physarum*, una pregunta saltó a su mente: ¿Cuál es la potencia, la fuerza motriz involucrada? Para averiguarlo, ideó un nuevo experimento. Para realizarla, toma un pequeño pedazo del *Physarum* y la hizo trabajar en una especie cápsula en forma de pesa de gimnasia y dos gotas conectadas por una línea delgada. Se pone esto en una cámara de aire dividido en dos compartimientos por un bloque de agar (C marcada en el diagrama, Fig 35). Las dos manchas, A y B, se encuentran en cámaras separadas sino que están conectados por la línea que pasa por un pequeño agujero en el agar. El flujo de corriente o streaming protoplasmático de A a B y viceversa, puede tener lugar a través de la cadena. La presión de aire en el compartimento B se mantiene constante; en A, se puede subir o bajar a voluntad. Cuando la presión es la misma en ambos compartimientos, la transmisión rítmica se produce normalmente a través de la cadena. Pero al aumentar la presión del aire en A, Kamiya puede disminuir la velocidad y detener el flujo de material de B a A. Cuando el flujo se ha detenido, que tiene la presión de aire con la fuerza protoplásmico. Así, observando el incremento de la presión, pudo medir la fuerza protoplásmica.

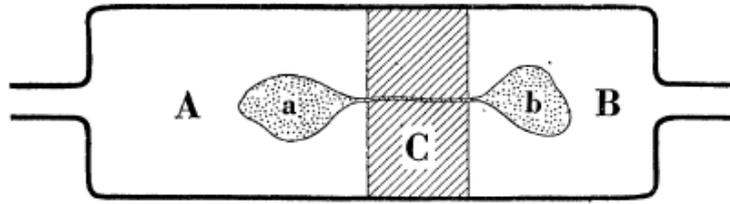


Fig. 36. Representación esquemática de la cámara. (Kamiya 1940)

En la revista *Science* (Kamiya 1940) se informó que esta fuerza llega a un promedio de casi cinco onzas por pulgada cuadrada<sup>387</sup>. Eso no es malo para el mixomiceto. Se trata de la misma presión ejercida sobre el fondo de un vaso de ocho pulgadas de agua. El rango del balance de presión suele ser de  $\pm 20$  cm de agua. El valor máximo absoluto han producido hasta ahora es de 28 cm de agua. Tan sensible es el movimiento del protoplasma que la más mínima desviación (menos de 0,2 cm de agua) desde el punto de equilibrio de la presión provocará el movimiento en una cadena de 8 mm de conexión.

Cuando Kamiya pasa el ascenso y caída de la fuerza del protoplasma en un gráfico, se exponen elegantes curvas. Esto excitó la admiración de Seifriz, que exclamó: “¿Has visto que curvas tan perfectas? No se ha visto nunca antes nada así. ¡Esto hace que la biología sea una ciencia exacta!”. Por otra parte, Kamiya ha tomado nota de los cambios definidos en las formas de onda y amplitud de sus curvas. Esto lo lleva a decir que *Physarum* tiene no sólo un ritmo, sino varios ritmos que actúan juntos. En otras palabras, el latido de vida del moho mucilaginoso no es sólo un golpe de tambor simple, se trata de una orquestación.

El ingenioso método de Kamiya parece dar mediciones muy precisas de las presiones de flujo que se desarrollan como las corrientes de protoplasma de ida y vuelta en el canal entre dos partes del plasmodio, y es de esperar que la técnica de Charles Hamilton Norris (1940) de la determinación de las propiedades elásticas del sistema del gel puede ser adaptado para medir los cambios de tensión que debe ocurrir de forma concomitante con la alternancia rítmica en la dirección del flujo.

En 1949 – después de haber sido repatriado siete años antes a Japón y contratado como profesor en la Universidad Imperial de Tokio – fue nombrado profesor del Departamento de Biología de la Universidad de Osaka, un nuevo departamento creado por un reconocido profesor de bioquímica: Shiro Akabori. Kamiya estuvo trabajando en dicho departamento durante 28 años. Él y sus colaboradores demostraron que la fuerza motriz de la corriente citoplasmática en el moho mucilaginoso está impulsado por la ATP como en el caso de la contracción muscular y se extrae del plasmodio una proteína contráctil llamado plasmodio B miosina, que es sensible a la ATP y capaz de superprecipitaciones. Él extendió su trabajo a la transmisión de giro frente al citoplasma de las células carofíceas, y demostró que la fuerza impulsora de la transmisión de una fuerza de deslizamiento generado en la frontera entre la superficie interna de la capa de

<sup>387</sup> Para pasar de oz·in (onzas por pulgada) a g·cm (gramos por centímetro) hay que multiplicar por 72,01.

cloroplasto inmóvil y el endoplasma streaming. Su premisa de que la estructura responsable de la transmisión debe estar en la interfaz de sol-gel fue confirmada por el hallazgo de paquetes de actina por sus alumnos. El mayor éxito en la medición de la fuerza motriz de la corriente citoplasmática de rotación por otro de sus métodos muy sofisticados. También midió la permeabilidad al agua de las células carofíceas con mucha precisión por el método de ósmosis transcelular, y consideró que la naturaleza polar de la membrana plasmática, la permeabilidad endoosmótica es más alta que una exoosmótica. La capacidad osmoregulatoria de las células carofíceas también fue demostrada por medio de la ligadura de la célula con hilo de seda después de osmosis transcelular (Kamiya 1960).

En septiembre de 1977, el año de su retiro de la Universidad de Osaka, fue nombrado profesor del nuevo Instituto Nacional de Biología Fundamental y puesto a cargo del “Laboratorio de Mecanismo Celular”, convirtiéndose en presidente del Departamento de Biología Celular. Además de ser el responsable de la creación del centro de biología de nuevas células en Japón, Kamiya se concentró en aclarar el mecanismo de contracción y relajación de la cadena de plasmodios por medio de un dispositivo de transducción electro-mecánico, que mide la tensión unidireccional de una cadena de plasmodios en contracción isotónica o isométrica con el cambio entre las dos de forma instantánea. Con este método, él y su grupo aclararon varios aspectos importantes de la dinámica celular de protoplasma, es decir, los cambios cíclicos de las estructuras del citoesqueleto (Kamiya 1981), la posible existencia de un mecanismo de captura conocido en el músculo de captura de moluscos, los cambios rítmicos en el ATP citosólico y la concentración de  $Ca^{2+}$ , y pH. Un logro importante fue el primer éxito de la preparación de hilo sintético de la actomiosina de origen celular no muscular de actina y miosina extraída de *Physarum plasmodio*. Este hilo podría generar una tensión que era dependiente de ATP.

Uno de los talentos únicos Kamiya fue su sencilla metodología en que se basa su filosofía para observar células y medir las actividades de células con la mínima perturbación. Sus métodos eran a veces muy simples, ya que él sabía el grado simple de eficiencia técnica puede ser bueno para encontrar respuestas a preguntas abiertas, pero en muchos casos, son muy sofisticados. Las técnicas simples incluyen cortar, ligación, la perfusión vacuolar y el derrame de endoplasma.

Kamiya no sólo fue un pionero en la investigación de los fenómenos de motilidad celular en células no musculares, sino también en la fisiología de las plantas mostrando una gran originalidad, tanto en las ideas como en las metodologías. Si comparamos una de sus monografías, “Protoplasmic Streaming” en 1959 con el libro de Alfred James Ewart en 1903 titulado “On the Physics and Physiology of Protoplasmic Streaming”<sup>388</sup>,

---

<sup>388</sup> Ewart, A. J. (1903) *On the Physics and Physiology of Protoplasmic Streaming in Plants*. Oxford . At the Clarendon press. Tan solo hay una referencia a los mixomicetos en la página 69 donde se menciona el retraso del flujo protoplasmático de los mixomicetos bajo la influencia de la luz, según los estudios de Hofmeister (1867) y de Baranetzsky (1876). Los estudios comparativos del flujo citoplasmático de Noburô Kamiya sería fundamentados a través del alga *Nitella*, de la que sí está ampliamente desarrollado el trabajo de Ewart.

nos sorprende la diferencia en el contenido entre los dos libros. La monografía es abundante en los nuevos resultados físico-químicos obtenidos mediante las técnicas únicas desarrolladas por el propio Kamiya. Tenemos la impresión de que había un vacío en la investigación en el campo de la motilidad celular de los vegetales de medio siglo que se llenó. Era de hecho una monografía de referencia que sentó las bases para la investigación moderna en biología celular vegetal, como lo demuestra el hecho de que fue nominado a los clásicos de citas, el 20 de noviembre de 1989 (Tazawa 1999). Esta contribución monumental fue seguido por muchos enfoques con resultados fructíferos y anunció una nueva era para la biología de las células funcionales en las plantas.

### **El desarrollo de la protistología actual sobre la investigación de los *Physarum polycephalum***

A partir de los años setenta, las investigaciones relacionadas con el *Physarum polycephalum*, no era muy diferente a las investigaciones sobre el *Dictyostelium discoideum*: comprender cómo funcionaba bioquímicamente el ciclo vital de ambos mohos mucilaginosos. Las investigaciones realizadas en esa época ofrecieron desde el reconocimiento del adenosin monofosfato cíclico (AMPC) como factor atractor de las células de *Dictyostelium* para la organización del pseudoplasmodio en forma de babosa pluricelular, hasta el reconocimiento del ATP como factor imprescindible para la actividad contráctil de la actomiosina en el plasmodio *Physarum polycephalum*, y cuya actividad se asemeja a la de un músculo (Pollard 1974) siendo el *Physarum* el modelo de célula primitiva donde se puede encontrar la transformación de una energía química en energía mecánica. Desde luego, los avances bioquímicos en estos factores han ofrecido una mejor atención en los comportamientos oscilatorios rítmicos de desplazamiento, por un lado, para estudiar mejor el comportamiento adaptativo al entorno; al igual que la capacidad de agregación sin perder la individualidad (como pseudoplasmodio) como factor altruista en algunas de sus intervenciones.

La capacidad contráctil del *Physarum polycephalum* semejante a la de una célula muscular – como células cardíacas – y su relación con el flujo de corriente citoplasmática fueron investigadas con el fin de encontrar las razones fisiológicas de la motilidad de los organismos primitivos que a penas han sufrido transformaciones con modificación al curso de la historia de la evolución.

Y. Yoshimoto y Noburô Kamiya (1978a, 1978b, 1978c, 1978d) encontraron que en los ritmos de contracción de una hebra de *Physarum polycephalum*, se producían sincronizaciones – al cabo de unos 20 minutos – de los ritmos locales después de haber separado una red de plasmodio. También se dieron cuenta que, incluso si se aplicaban fuerzas externas al plasmodio para modificarle su forma, aun aumentando la amplitud de oscilación, el plasmodio no cambia los periodos de cada fase del ciclo vital. También describieron el papel del endoplasma en el “streaming” como portador de información para la sincronización de cadenas de plasmodios que han sido previamente separadas y luego puenteadas por otro trozo de hebra.

Por su parte, el biólogo Karl-Ernst Wohlfarth-Bottermann (1923-1997) estudió las siguientes zonas que podrían tener relación con la localización del oscilador:

- (1) actomiosina citoplasmática (Wohlfarth-Bottermann 1977),
- (2) el sistema de suministro de energía (Wohlfarth-Bottermann y Achenbach, 1980),
- (3) la reserva de  $\text{Ca}^{2+}$  interno, (Wohlfarth-Bottermann y Achenbach, 1980) y
- (4) el plasmalema, que deben participar al menos en la modulación de la fuerza generada por la maquinaria contráctil durante la respuesta quimiotáctica (Wohlfarth-Bottermann 1974; Achenbach, Naib-Majani y Wohlfarth-Bottermann 1979).

Wohlfarth-Bottermann (1979) evaluó de la producción de fuerza oscilante en:

- (1) la persistencia de la actividad contráctil longitudinal de las venas
- (2) la persistencia de la actividad radial de las venas,
- (3) la nueva generación de actividad contráctil en gotas de protoplasma.

Los datos parecen excluir el transporte rítmico de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  a través del plasmalema o membrana plasmática como una función de desencadenamiento de la oscilación. La actividad contractil parece representar una oscilación espontánea, endógena, que puede ser modulada a través del plasmalema durante la quimiotaxis. Ahora bien, ¿esto es realmente así? O existe una capacidad auto-inductora de la oscilación rítmica que permite la regulación del “streaming” citoplasmático. Durante más de 20 años el tema ha sido motivo de múltiples estudios (Wohlfarth-Bottermann y Achenbach, 1980). Noburô Kamiya y sus colegas (Yoshimoto, Sakai y Kamiya 1981) descubrieron algo importante que conllevaría nuevos estudios sobre los ritmos oscilatorios de contracción. Demostraron que la concentración interplasmoidal de ATP libre puede oscilar con el mismo periodo como el ciclo de contracción – relajación de la hebra de plasmodio, y que el nivel de ATP libre es máximo en la fase de máxima tensión y mínima en la fase de tensión mínima (o sea, en fase de relajación). Con esto se demostraba las coordinaciones entre los movimientos oscilatorios y las concentraciones de ATP o incluso de  $\text{Ca}^{2+}$  tienen un factor en común. Pero debía de investigarse si el ATP o el  $\text{Ca}^{2+}$  son inductores de las oscilaciones, o el origen de las oscilaciones se da por otras causas.

*Physarum polycephalum* plasmodia

Total size : 1–1000 mm

Vein diameter : 0.1 – 1 mm

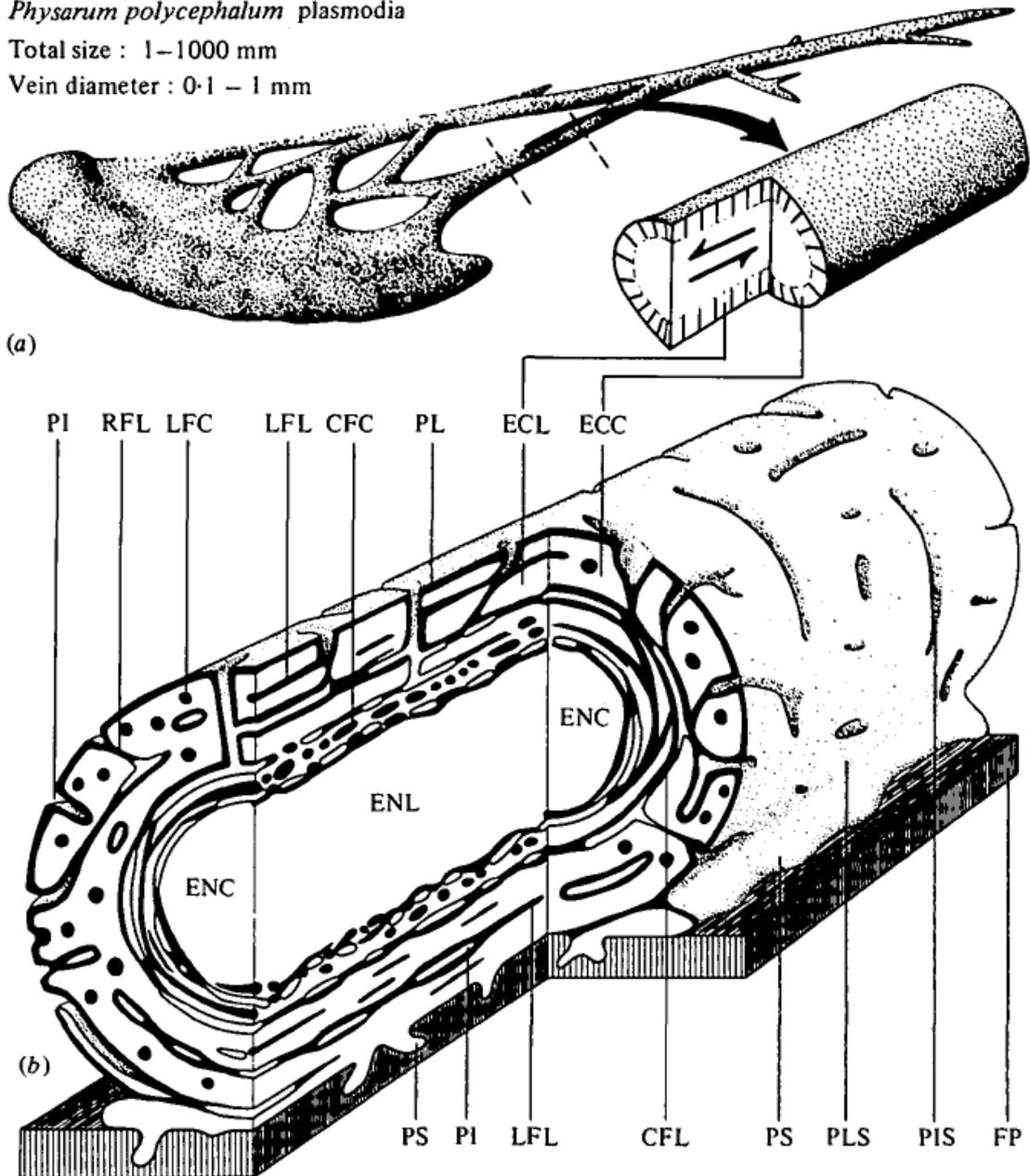


Fig. 37 (a). Diagrama de locomoción de un plasmodio *Physarum*. Lado izquierdo: región frontal, lado derecho: venas protoplasmática en la parte trasera. El recuadro (flecha) simboliza la estructura interna de la vena: la eclosión = tubo de ectoplasma, blanco = núcleo  $\rightleftharpoons$  endoplásmico; cambio de dirección del transporte endoplásmico durante el flujo de transporte. (b) La estructura detallada de una vena. Fibrillas de actomiosina se limitan a la región de ectoplasma. CFC, fibrillas de circular en sección transversal; CFL, fibrillas circulares en la sección longitudinal; ECC, ectoplasma en sección transversal; ECL, ectoplasma en la sección longitudinal; ENC, endoplasma en sección transversal; ENL, endoplasma en la sección longitudinal; FP, filtro de papel; LFC, fibrillas longitudinales en la sección transversal; LFL, fibrillas longitudinales en sección longitudinal; PI, invaginación de la plasmalema, PIS, invaginación del plasmalema vista de superficie; PL, plasmalema, PLS, plasmalema superficie, PS, seudópodo; RFL, fibrillas radiales en sección longitudinal (Fleischer y Wohlfarth-Bottermann 1975).

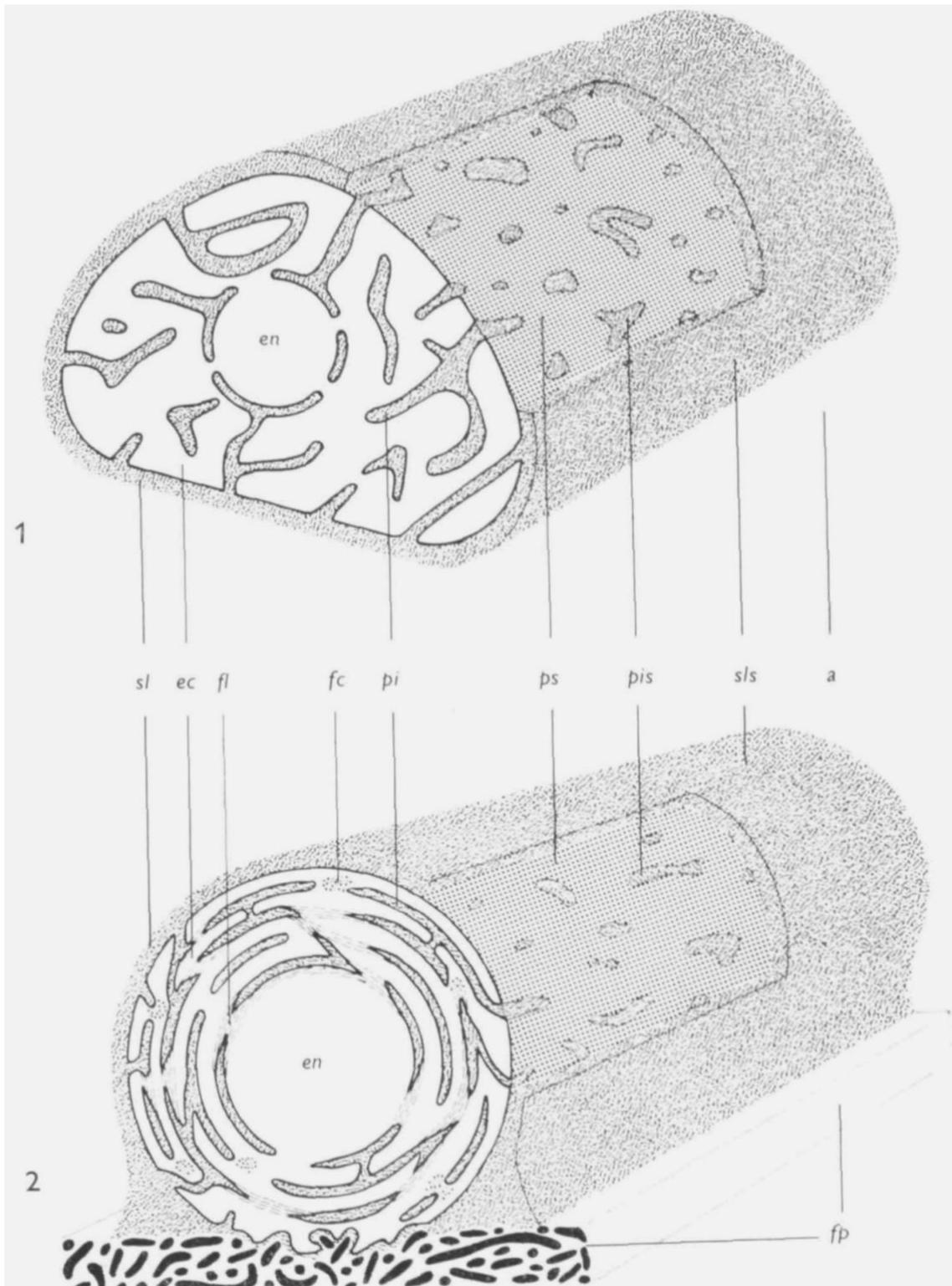


Fig. 38. (1). Esquema de la estructura representativa, de luz microscópica, de pequeñas hebras de plasmodios de cultivos de agar. (2). Esquema de la estructura característica de las grandes cadenas de cultivos crecidos en papel de filtro: a, agar; ec, pared ectoplasma; en, canal endoplásmico; fc, fibrilar en sección transversal; fl, fibrilar en la sección longitudinal; fp, filtro de papel; pi, invaginación del plasmalema, pis, la invaginación del plasmalema vista de superficie; ps, plasmalema vista de superficie; sl, limo capa; sls, la capa de limo desde la superficie (Wohlfarth-Bottermann 1974).

## **Tetsuo Ueda. Las oscilaciones periódicas como parámetro de un comportamiento adaptativo.**



**Tetsuo Ueda**

Tetsuo Ueda (discípulo de Kamiya, Wohlfarth-Botterman y de Kobatake) de la Universidad de Hokkaido y su grupo de investigación descubrieron en 1986 que la distribución de ATP en el plasmodio no es homogénea, habiendo mayor cantidad en la punta de locomoción del plasmodio y menor concentración en la cola, lo que hace que las fases oscilatorias sean independientes en diversas zonas. Aún así, entre ellas se detectó una tendencia a acoplarse los periodos en fase, con lo que no pierden la capacidad de unificar esfuerzos para la coherencia en el desplazamiento (Ueda, Matsumoto, Akitaya, y Kobatake 1986; Ueda, Nakagaki y Kobatake 1988). De esta manera, el plasmodio *Physarum polycephalum* muestra patrones de dos dimensiones en la oscilación de espesor. Las modulaciones del patrón de oscilación en respuesta a la estimulación local fueron estudiadas por Ueda y sus colegas mediante la aplicación de procesamiento de imágenes por ordenador (Matsumoto, Ueda, Kobatake, 1986). En una extensión concéntrica del plasmodio, las oscilaciones fueron llevadas a una sola frecuencia, y los vectores gradiente de fase señalaban de forma radial y sobre todo hacia el interior. Cuando una parte del plasmodio fue expuesta a diferentes temperaturas o productos químicos, las oscilaciones continuaron arrastrándose, pero nuevas ondas de propagación en fase comenzaron a oscilar en unos pocos minutos alrededor de la región estimulada. Los vectores gradiente de fase señalaban acercándose no tanto a los estímulos atractivos (alta temperatura, la glucosa, la avena) sino más bien hacia los repulsivos (baja temperatura, sales, alta osmolaridad, las condiciones anaeróbicas). Por lo que la información detectada parece integrarse en el nivel de interacción de los osciladores. La hipótesis de Ueda afirma que el procesamiento de la información o de comunicación en una célula ameboide está relacionado con un comportamiento cooperativo en el sistema de osciladores que interactúan. De esta manera pudo demostrar que las ondas de propagación de fase están relacionadas con la discriminación en el comportamiento táctico.

Como podemos ver, la organización espacio-temporal de una migración del plasmodio depende de las concentraciones intracelulares de adenina y nucleótidos cíclicos. Se han detectado concentraciones de ATP y de ADP aproximadamente el doble tanto en la parte delantera como en la trasera, mientras que la distribución de AMP ha sido uniforme a lo largo del plasmodio. Por otro lado, las concentraciones de AMP cíclico y de GMP cíclico son varias veces superiores en la parte trasera que en la frontal, mostrando oscilaciones en el medio. Ueda demostró que existe un bucle de retroalimentación de  $ATP-H^+-AMPc-Ca^{2+}$  como un posible oscilador metabólico, y que en el mecanismo de contracciones rítmicas participa las mitocondrias al expulsar  $Ca^{2+}$  induciendo entonces a la polarización del plasmodio. La distribución espacial bidimensional del ATP depende de la forma de la célula: un patrón polar unidireccional

para una migración del plasmodio, una forma de tazón para un plasmodio circular, una forma de montículo para un plasmodio oval, o un patrón ondulado para plasmodios estimulados con luz azulada o confinados en una pequeña cámara. Las formaciones de patrones en la concentración de ATP intracelular fue discutido si se podía hablar de osciladores químicos acoplados en un sistema auto-organizado. Cosa que ha podido demostrarse posteriormente con los trabajos de Atsuko Takamatsu como veremos muy pronto. Lo interesante resulta que Ueda demuestra que se establece una sincronía oscilatoria entre las contracciones rítmicas hacia la periferia del plasmodio. La zona frontal y periférica oscila sincrónicamente, aunque su fase parezca opuesta a su interior. En el interior del plasmodio donde se forman las mallas de pequeñas venas no hay coherencia, pero difieren de una región a otra como en una migración del plasmodio. Su sincronía persiste por unos minutos aunque se corten pequeñas piezas de la punta. Es aquí donde hay un comportamiento extraordinario en el plasmodio que hace que su morfología sea de mucho interés: que la fragmentación del plasmodio no perturba la vida del mismo, ni su auto-organización ni su desarrollo posterior de ninguna de las partes fragmentadas.

Otros de los aspectos interesantes del comportamiento oscilatorio del *Physarum polycephalum* estudiados por el profesor Ueda reside en que la oscilación del AMP cíclico acompaña a la contracción rítmica. Eso significa que las reacciones químicas que involucran al AMP cíclico participan en la regulación de la contracción rítmica del *Physarum polycephalum*. Recordemos que la concentración de AMP cíclico – como hemos visto anteriormente – está involucrado en la atracción multicelular de los *Dictyostelium discoideum* en forma de espiral para la generación de la babosa. La señalización pulsátil es el comienzo quimiotáctico de la fase de agregación del *Dictyostelium discoideum*. Dicha pulsación del *Dictyostelium discoideum* y la actividad oscilatoria del *Physarum polycephalum* tienen al AMP cíclico como factor desencadenante (externo en el caso del *Dictyostelium*, interno en el caso del *Physarum*) de oscilaciones pulsátiles. Veremos hasta dónde llegan a ser fundamentales sus concentraciones en cada caso.

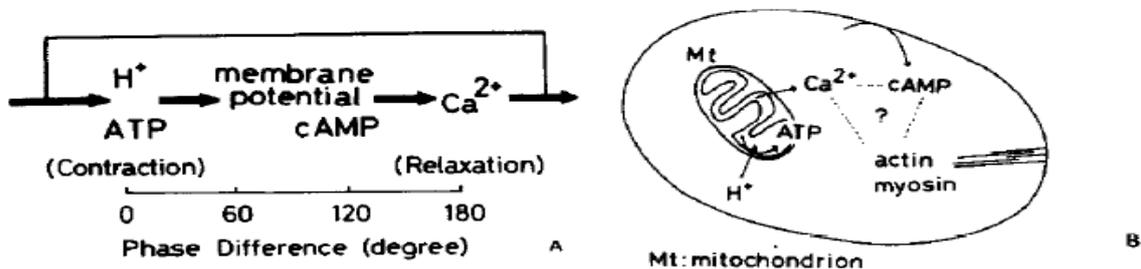


Fig. 39. Un posible mecanismo de la oscilación en *Physarum*. (A) Un control de bucle de retroalimentación que representa las relaciones de fase entre los componentes oscilantes en el plasmodio *Physarum*; (B) Ilustración esquemática que muestra las reacciones químicas pertinentes en los organelos. Las descripciones están en mínimo detalle. Las mitocondrias son un campo donde la información se lleva a cabo entre H<sup>+</sup>, ATP y Ca<sup>2+</sup> (Ueda, Matsumoto, Akitaya, y Kobatake 1986).

La frecuencia de la oscilación metabólica es la misma con el ritmo de contracción, pero las fases son diferentes para cada metabolito (Ueda 2006). Por ejemplo el ATP y las concentraciones de calcio oscilan en fase y en anti-fase, respectivamente, con el ciclo de contracción y relajación avanzándose 1/3 sobre el periodo; mientras el potencial de la membrana y el GMP cíclico oscilan con una fase 90° de diferencia. En este sentido, el protoplasma del plasmodio está en un estadio oscilatorio como un todo. Esto es, que la noción de homeostasis no es aplicable en el plasmodio. Esto fue revelado por su maestro Karl Ernst Wohlfarth-Bottemann y colegas (1983) cuando observaron que, inhibiendo la actividad de la mitocondria en la exhalación de  $\text{Ca}^{2+}$ , los grados de contractura parecen ser independientes de la presencia de diferentes concentraciones externas de  $\text{Ca}^{2+}$ .

También la coenzima intracelular llamada NAD(P)H o nicotinamida adenina dinucleótido fosfato, acompaña a la contracción del plasmodio, oscilando casi con el mismo período que la contracción rítmica pero con una fase diferente, retrasándose sobre 1/3 del periodo contráctil. El NAD(P)H juega un papel importante en la regulación de varias actividades metabólicas<sup>389</sup>, y sin embargo no actúa sobre el sistema de la actomiosina directamente (Mori, Ueda y Kobatake 1987). Curiosamente la fase de oscilación del AMP cíclico en el plasmodio se avanza 1/3 del periodo contráctil y también actúa de manera indirecta sobre el sistema de la actomiosina (Ueda, Matsumoto, Akitaya y Kobatake 1986).

Viendo la actuación tanto del segundo mensajero AMPc como de la coenzima NAD(P)H ¿podemos entonces hablar que el protoplasma de la célula oscila como un todo? En la variación de fosfolípidos – los constituyentes de mayor cantidad en las membranas protoplásmicas – se hace más evidente aún. De hecho los fosfolípidos estudiados (Ueda, Inagaki y Yoshida 1992) como el ácido fosfatídico y la fosfatidilserina se encuentran oscilando en la célula de forma homogénea. Por lo que se puede concluir de forma fehaciente que el protoplasma de una célula plasmodial se encuentra en un estado de oscilación.

Tetsuo Ueda observó que la forma de las células ameboides cambian según su locomoción elongándose y encogiéndose periódicamente y su cualidad de actuación se ve cuantificada a través de un parámetro complejo definido como  $(\text{perímetro})^2 / (\text{área})$  y su variación en el tiempo es analizado por un procesador de imágenes microcomputerizado (Ueda y Kobatake 1983). El espectro de potencias seriadas en el tiempo indica un grado de periodicidad. Se han encontrado resultados similares en todas

---

<sup>389</sup> La nicotinamida adenina dinucleótido fosfato (abreviada NADP+ en su forma oxidada y NADPH+ en su forma reducida) es una coenzima que interviene en numerosas vías anabólicas. Su estructura química contiene la vitamina B3 y es además análogo de la nicotinamida adenina dinucleótido (NADH+H+; NAD+ en su forma oxidada). Su fórmula empírica es  $\text{C}_{21}\text{H}_{29}\text{N}_7\text{O}_{17}\text{P}_3$

El NADPH+H+ proporciona parte del poder reductor necesario para las reacciones de reducción de la biosíntesis. Interviene en la fase oscura de la fotosíntesis (ciclo de Calvin), en la que se fija el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ); el NADPH+H+ se genera durante la fase luminosa. En los animales, la mayor fuente de NADPH+H+ es la fase oxidativa de la ruta de la pentosa fosfato, que produce 60% de los requerimientos de la célula. Fuente de información: Wikipedia®.

las células ameboides como leucocitos, macrófagos (microglías), protozoos y mixomicetos (Sato, Ueda y Kobatake 1985). Toda esa periodicidad en la forma de la célula, según Ueda, puede ser reflejo de oscilaciones químicas como hemos visto anteriormente.

### **Atsuko Takamatsu. Los osciladores acoplados microfabricados y el concepto de “mobiligence”**

Atsuko Takamatsu es actualmente una de las investigadoras más importantes sobre el comportamiento oscilatorio del *Physarum polycephalum*. Actualmente es profesora titular del departamento de ingeniería eléctrica y ciencias biológicas de la Universidad de Waseda. Después de máster, había estado empleada en una fábrica de aparatos eléctricos, como un ingeniero de sistemas durante tres años. Luego regresó a Tokyo Institute of Technology para obtener Ph.D. y se apoyó la ciencia no lineal en la biología y la biología matemática. Estuvo haciendo su posdoctorado en el laboratorio de sistemas bioquímicos de RIKEN, del instituto de investigaciones física y química en Hirosawa.



Takamatsu y su equipo examinan los fenómenos biológicos desde la perspectiva de la biología matemática, la biofísica, los sistemas complejos, y la ciencia no lineal, entre otras perspectivas disciplinarias. Sus intereses de investigación incluyen ritmos específicos, la formación de patrones, la dinámica de la red, la auto-organización y los sistemas de osciladores acoplados en los sistemas biológicos. Los organismos vivos están formados por componentes biológicos, tales como genes, proteínas y otras biomoléculas. La

**Atsuko Takamatsu** comprensión o el conocimiento de los componentes biológicos únicamente son insuficientes para comprender cómo los seres vivos se comportan en sus ambientes naturales. Takamatsu piensa que se ha de adoptar un enfoque sintético y sistemático por los cuales los organismos vivos han de ser considerados como sistemas de elementos interactuantes, tales como células, tejidos, o los individuos.

La mayoría de los sistemas biológicos incorporar redes para el transporte de diversas sustancias, como oxígeno, nutrientes, y las células. Pero ¿son eficientes las redes de transporte de los sistemas biológicos? Trabajando desde la perspectiva de la ciencia de redes complejas, se determinó la estructura de las redes del tubos de transporte, con *Physarum polycephalum* como modelo. Éste formas las redes de transporte en el que la transmisión del flujo de protoplasma aparecen varias sustancias, incluyendo el oxígeno, útiles para el transporte. Un estudio (Takamatsu, Takaba y Takizawa 2009) mostró que las morfologías de la red dependen del medio ambiente, incluso para las células tomadas de cepas idénticas. Además, la morfología determina el consumo de energía. Compararon los resultados obtenidos con el patrón observado en los sistemas de colonias de bacterias, como los *Bacillus subtilis*, relacionados con la quimiotaxis y la motilidad celular (Ben-Jacob y colegas 1992; Ben-Jacob y colegas 1994). Las colonias de bacterias, *B. subtilis* muestra una forma de disco con la dotación aproximada en la

concentración de nutrientes. Por lo que muestran unas formaciones dendríticas semejantes a la morfología de ramificación densa (DBM) o la agregación limitada por difusión (DLA)<sup>390</sup> en concentración baja de nutrientes.

Takamatsu ha estado trabajando desde el año 2000 en la construcción de un sistema vivo de osciladores acoplados a través de técnicas de microfabricación (Takamatsu, Fujii y Endo 2000a, Takamatsu, Fujii, Yokota, Hosokawa, Higushi y Endo 2000b). La técnica de modelado de una célula es importante para la observación de las células vivas de una manera sistemática, especialmente desde el punto de vista de la ciencia no lineal, lo que nos permite tratar a un complicado sistema como un sistema vivo por una forma de matemáticas. Takamatsu ha desarrollado un método de modelaje de células y ha fabricado un sistema de oscilador acoplado vivo con el plasmodio *Physarum polycephalum* utilizando una estructura microfabricada. El plasmodio es un organismo unicelular ameboide grande que consiste en una estructura casi homogénea sin un sistema altamente diferenciado como un sistema nervioso, pero muestra una respuesta al cambio en el ambiente. El comportamiento de respuesta se considera que está causada por las interacciones entre los cuerpos celulares internos donde se pueden observar fenómenos oscilatorios no lineales. Por lo tanto, el plasmodio puede considerarse como un sistema de osciladores acoplados. Para entender el mecanismo del comportamiento del plasmodio, es esencial observar el comportamiento en condiciones donde las interacciones entre los cuerpos celulares son sistemáticamente controladas.



Fig. 40(1) Una estructura microfabricada. Fig. 40(2) Un sistema de vida junto oscilador. Fig. 40(3) Un patrón de oscilación

El equipo de Takamatsu ha modelado la forma del plasmodio con una microestructura (Fig. 40(1)) fabricada con una resina fotosensible por un método de fotolitografía<sup>391</sup>. Con este sistema, se construyeron dos sistemas de oscilador múltiples del plasmodio (Fig. 40(2), 40(3)) y se han observado fenómenos oscilación mediante el control de los

<sup>390</sup> Agregación limitada por difusión (DLA, por sus siglas en inglés: Diffusion-limited aggregation) es un proceso en el cual partículas sometidas a paseo aleatorio debido al movimiento browniano se aglomeran para formar agregados de tales partículas. Esta teoría, propuesta por Witten y Sander (1981) es aplicable a la agregación de cualquier sistema donde la difusión es el medio primario de transporte en el sistema. Las agregaciones formadas en procesos DLA son referidas como árboles brownianos. Esas agrupaciones son ejemplo de un fractal. En dos dimensiones, esos fractales exhiben una dimensión de aproximadamente 1,70 por partícula libre que no están restringidas por una frontera, entretanto simulación computacional de una región restringida, irá a alterar la dimensión fractal levemente para un DLA en la misma dimensión encajante. Algunas variaciones también son observadas, dependiendo de la geometría del crecimiento, que irradie un único punto radialmente hacia fuera o de un plano o línea, por ejemplo. Fuente: Wikipedia®.

<sup>391</sup> La fotolitografía es un proceso empleado en la fabricación de dispositivos semiconductores o circuitos integrados. El proceso consiste en transferir un patrón desde una fotomáscara (denominada retícula) a la superficie de una oblea. El silicio, en forma cristalina, se procesa en la industria en forma de obleas. Las obleas se emplean como sustrato litográfico, no obstante existen otras opciones como el vidrio, zafiro, e incluso metales. Fuente: Wikipedia®.

parámetros de interacción entre los osciladores. Hemos encontrado que los patrones de oscilación variaron de forma dinámica en función de los parámetros, de la misma manera que la predicción de un modelo matemático de un sistema de osciladores acoplados. Este enfoque de análisis cara a cara es importante para entender los sistemas biológicos complejos. Además, para este tipo de análisis, la técnica de microfabricación es una de las tecnologías clave.

También Takamatsu (Takamatsu, Fujii y Endo 2000c) estudió el efecto del retraso temporal en un sistema de osciladores acoplados vivos. Encontró que la frecuencia de oscilación varía dependiendo del acoplamiento firme y el retraso del tiempo; y la transición del patrón de oscilación se repite en función de dichos parámetros. El patrón espaciotemporal en los anillos de osciladores acoplados fue investigado por la comparación con los resultados analizados por la teoría de la bifurcación de Hopf simétrico<sup>392</sup> basado en la teoría de grupos desarrollada por Glubitsky y Stewart (1998)<sup>393</sup>. En tres, cuatro y cinco sistemas oscilatorios, cualquier tipo de patrón de oscilación predicho por la teoría se observaron como también un nuevo modo de oscilación, una oscilación de medio periodo, que no se ha informado en ningún lugar con sistemas prácticos. Los resultados de Takamatsu apoyan la eficacia de la teoría de la bifurcación de Hopf simétrica en los sistemas prácticos (Takamatsu, Tanaka, Yamada, Nakagaki, Fujii y Endo 2001).

Los mecanismos para la generación de conductas adaptativas inteligentes es actualmente un tema que no se comprende completamente. Como una función adaptativa se considera que surge de la interacción del cuerpo, el cerebro y en medio inmediato, que exige al agente su actuación o su quiescencia. Hasime Asama, profesor de investigación de artefactos del centro de ingeniería (RACE) de la Universidad de Tokio, denomina “*mobiligence*” a la capacidad inteligente para la generación de nuevas adaptaciones de la función motora tanto en organismos vivos como para la robótica. El caso es que el moho mucilaginoso no tiene cerebro ni sistema nervioso para procesar la información del entorno. ¿Cómo lo hace entonces? Takamatsu es miembro colaborador del “Mobiligence Project” para el análisis de las funciones motoras adaptativas en organismos biológicos sin sistema nervioso. Takamatsu tiene como objetivo comprender la “*mobiligence*” de los *Physarum polycephalum* a través de sistemas de osciladores acoplados incorporados con una función simple de motilidad para luego describirlo matemáticamente.

Takamatsu y colegas (2007) enfocaron su estudio sobre la topología de redes dependiente del entorno para investigar la relación entre patrones espaciotemporales y

---

<sup>392</sup> En la teoría matemática de las bifurcaciones, una bifurcación de Hopf o de Poincaré-Hopf-Andronov, el nombre de Henri Poincaré, Eberhard Hopf, y Aleksandr Andronov, es una bifurcación local en el que un punto fijo de un sistema dinámico pierde la estabilidad como un par de complejos conjugados  $\lambda_{1,2} = \pm i\omega_0$ , con  $\omega_0 > 0$ . Los valores propios de la linealización alrededor del punto fijo cruzan el eje imaginario de la plano complejo. Bajo supuestos razonables genéricos sobre el sistema dinámico, podemos esperar ver una pequeña amplitud del ciclo límite de ramificación en un punto fijo.

<sup>393</sup> M. Golubitsky, I.N. Stewart and D.G. Schaeffer. *Singularities and Groups in Bifurcation Theory: Vol. II. Applied Mathematical Sciences 69* Springer-Verlag, New York, 1988

la conducta. El objetivo es dilucidar el mecanismo de adaptación a través de la morfología y resumir su algoritmo. Takamatsu llega a la conclusión de que el plasmodio *Physarum* no puede nada más que generar la red tubular de forma pasiva mediante la recepción de información externa. Sin embargo, observan un comportamiento eficaz mediante la generación de la estructura espacio-temporal y, a veces fluctuante a través de las interacciones locales entre los nodos simples. Aunque el plasmodio es simple y primitivo, se puede tener una estrategia inteligente y elegante para la adaptación de sacar el mejor partido de los limitados recursos. Esto podría ser consecuencia natural de que el sistema se compone de unidades simples.

Incluso cuando el plasmodio se divide en partes, cada parte se comporta como una célula única oscilante sin perder funciones biológicas. Por tanto, el plasmodio puede ser considerado como un colectivo de unidades, es decir, de osciladores acoplados. Por otro lado, la célula forma una red de estructura tubular, en cuyo interior se observa el flujo de transporte (streaming) protoplásmico. El streaming actúa como la interacción entre las unidades. Curiosamente, la morfología de la red de plasmodios depende del estado del medio ambiente, así como de la frecuencia de oscilación. Esto sugiere que la morfología de la red podría afectar a la función biológica para adaptarse al medio ambiente.

Actualmente, el equipo de Takamatsu se centra únicamente en la topología de la red tubular habiéndose analizado la estructura de red para cada entorno. En este estudio, analizaron la relación entre la dinámica de la red y la función biológica de la interacción entre el plasmodio teniendo en cuenta el medio ambiente y para la obtención de un algoritmo de adaptación de la morfología de la red dinámica. Takamatsu y colegas analizaron la topología de la red en función de las condiciones ambientales. Observaron que el plasmodio mostraba redes hexagonales bajo condiciones atractivas. Sin embargo, la red en condiciones repulsivas no tiene un sencillo árbol gráfico de la red, sino que están con procesos de generación y degeneración de los bordes.

Para lograr el objetivo y dilucidar el mecanismo que hace depender la morfología del medio ambiente para así investigar la funcionalidad y la eficiencia de cada red, cuantificaron el proceso de crecimiento de la red y obtuvieron algún indicio en el dominio en cuestión. En cuanto a la conducta adaptativa de los plasmodios, podríamos hablar de una cierta especulación. La morfología más eficiente para los plasmodios en condición repulsiva puede ser el grafo en árbol el más rápido para escapar de un mal ambiente y para encontrar uno mejor con los recursos limitados, mediante el uso del proceso de generación / degeneración; Por otro lado, la morfología más eficiente para las condiciones atractivas podría ser la densa red de tubos delgados que absorben más nutrientes. Takamatsu aún ha dejado varios temas a examinar, por ejemplo, cómo son las eficiencias de la migración, o la absorción de nutrientes, o el transporte de protoplasma, o la probabilidad de hallazgo de un mejor ambiente entre otros.

## Toshiyuki Nakagaki: Hacia una descripción de la cognición en los mixomicetos:

Toshiyuki Nakagaki recibió su licenciatura en 1987 y el máster en 1989 en ciencias



**Toshiyuki Nakagaki**

farmacéuticas en la Universidad de Hokkaido, y se doctoró en biofísica por la Universidad de Nagoya en 1997. Ha sido profesor asociado del Instituto de Investigación de Ciencias Electrónicas (RIES), y de la División de Investigación Innovadora del CRIS (Creative Research Initiative “Sousei”) ambas de Universidad de Hokkaido, desde 2004. Sus intereses de investigación incluyen el procesamiento de la información a nivel celular, el desarrollo evolutivo de la base material de la inteligencia y de la astucia, y la computación biológica orgánica y bioquímica en sistemas dinámicos no lineal, estudiado a través del auténtico moho mucilaginoso *Physarum polycephalum*. Actualmente es profesor asociado en la Facultad del Departamento de Inteligencia de

Sistemas Complejos de la Future University Hakodate.

Su tesis doctoral, titulada “*Expresión de comportamiento de las células basadas en la auto-organización de los osciladores no lineales acoplados*”<sup>394</sup> defendida en 1997 en la Universidad de Nagoya, abre un camino importantísimo en el estudio de la comportamiento adaptativo del mixomiceto auténtico *Physarum polycephalum* a través de su motilidad oscilatoria múltiple.

En 1990, se integró en el equipo de Tetsuo Ueda en la Universidad de Hokkaido en Saaporo, Nakagaki (1990)<sup>395</sup> publicando un artículo dedicado a la organización dinámica del ATP y de las fibrillas birrefringentes<sup>396</sup> cuando están en movimiento libre y en galvanotaxia (direccionalidad estimulada por un campo eléctrico) en el plasmodio.

La migración dirigida por una célula es un fenómeno muy bueno para el estudio de la coordinación intracelular. La organización dinámica de las dos fibras de la ATP birrefringentes en toda la célula se ha estudiado en la célula multinuclear ameboide del plasmodio *Physarum* durante la locomoción y la galvanotaxia libre. En una migración direccional del plasmodio, las ondas de la ATP, así como las oscilaciones de espesor propagado desde dentro del frente de avance en la parte trasera, la concentración de

<sup>394</sup> “結合非線形振動子系の自己組織化に基づく細胞行動の発現” título de la tesis en japonés

<sup>395</sup> Ueda, T., Nakagaki, T. and Yamada, T. (1990) Dynamic organization of ATP and birefringent fibrils during free locomotion and galvanotaxis in the plasmodium of *Physarum polycephalum*. *J. Cell Biol.* 110, 1097-1102.

<sup>396</sup> La birrefringencia o doble refracción es una propiedad óptica de ciertos cuerpos de desdoblarse un rayo de luz incidente en dos rayos linealmente polarizados de manera perpendicular entre sí como si el material tuviera dos índices de refracción distintos: la primera de las dos direcciones sigue las leyes normales de la refracción y se llama rayo ordinario; la otra tiene una velocidad y un índice de refracción variables y se llama rayo extraordinario. Ambas ondas están polarizadas perpendicularmente entre sí. Este fenómeno sólo puede ocurrir si la estructura del material es anisótropa. Si el material tiene un solo eje de anisotropía, (es decir es uniaxial), la birrefringencia puede describirse asignando dos índices de refracción diferentes al material para las distintas polarizaciones.

ATP es alta en la parte delantera de la media. Aplicando un campo eléctrico de corriente continua, la locomoción se inhibió, la concentración de ATP disminuyó mucho, y se formaron en abundancia más fibrillas birrefringentes en la parte anódica que en la parte catódica. Dentro de la célula había unas pocas ondulaciones en la distribución del ATP y de fibrillas birrefringentes. En resumen, las fibrillas birrefringentes aumentan cuando la concentración de ATP decrece. En los citoesqueletos se observan como fibrillas birrefringentes que aparecen y desaparecen rítmicamente están compuestas de actina / miosina. ¿Puede el ATP regular la organización del citoesqueleto directamente? Existe alguna evidencia que lo apoya: El ATP provoca la contracción en una hebra de actomiosina reconstituida (Matsumura, Hoshimoto y Kamiya 1980)<sup>397</sup>, y una alta concentración de ATP disuelve la actina.

Los resultados obtenidos por Ueda y Nakagaki también ofrecen una nueva mirada sobre el mecanismo de galvanotaxia (motilidad y orientación en respuesta a un campo eléctrico de baja intensidad) en las células ameboides.<sup>398</sup> Éstos son consistentes con las teorías basadas en el mecanismo local, pero, más importante aún, Nakagaki mostró que *el protoplasma reacciona como un todo para el campo eléctrico y se auto-organizan nuevas distribuciones de ATP intracelular y del citoesqueleto*.

Esta capacidad de orientación por galvanotaxis nos induce a pensar la conductividad y la conductancia eléctrica que posee la ameba tanto intracelular como extracelularmente. La corriente eléctrica está también involucrada en los movimientos celulares. Como vemos, afecta a la direccionalidad de la actomiosina, pero también afecta a la transducción de señales para la quimiotaxis, con lo que *la capacidad de conductividad permitiría establecer una equivalencia con un sistema nervioso*; algo que ya tuvo sus primeros descubrimientos con las investigaciones de William Seifriz (1938) y de Harold Saxton Burr (1955), mencionados anteriormente.

### **El caso de la solución del laberinto**

Pero el éxito de Nakagaki surgió con la concesión del IgNobel en ciencias cognitivas, en el año 2008, por un importantísimo trabajo realizado en el año 2000 y publicado en el n° 407 de la revista Nature, el 20 de septiembre. Este artículo titulado: “*Maze-solving by an amoeboid*” (Laberinto resuelto por un ameboide) ha sido el punto de inflexión para las investigaciones sobre los mixomicetos en cuanto a su condición de posibilidad de una conducta adaptativa inteligente. El trabajo fue desarrollado junto con Hiroyasu Yamada – también del RIES de la Hokkaido University – y Ágota Tóth, del Departamento de Físico-Química y Ciencias de los Materiales de la Szeged University en Hungría.

---

<sup>397</sup> Matsumura, F., Hoshimoto, Y., Kamiya, N. (1980) Tension generation by actomyosin thread from a non-muscle system. Nature (Lond.). 285: 169-171.

<sup>398</sup> Se ha tratado de identificar la ubicación de los lugares activos en la célula; por ejemplo, la migración preferencial hacia el cátodo en el plasmodio *Physarum* se explica por la supresión selectiva de la extensión pseudópoda en el lado anódico, o se mueve el protoplasma hacia el cátodo, porque el protoplasma contrae y empuja al sol protoplásmico desde el lado del ánodo hacia el lado del cátodo.

Tomaron un crecimiento en la punta de un tamaño adecuado de un plasmodio de unos 25 a 35 cm a través del cultivo y la dividieron en pequeños trozos. A continuación, colocaron estas en un laberinto (que mimetiza un patrón similar una reacción de Belousov-Zhabothinsky) creado por el corte de una película de plástico y lo colocaron sobre una superficie de agar. Las piezas plasmodiales se propagaron y se unieron para formar un solo organismo que llenaba el laberinto (La figura. 41a), Evitando la superficie seca de la película de plástico. En los puntos inicial y final del laberinto, colocaron bloques de agar de dimensiones 0,5x1x2 cm con nutrientes (0,1 mg/ml de copos de avena). Había cuatro rutas posibles ( $\alpha 1$ ,  $\alpha 2$ ,  $\beta 1$ ,  $\beta 2$ ) entre los puntos inicial y final.

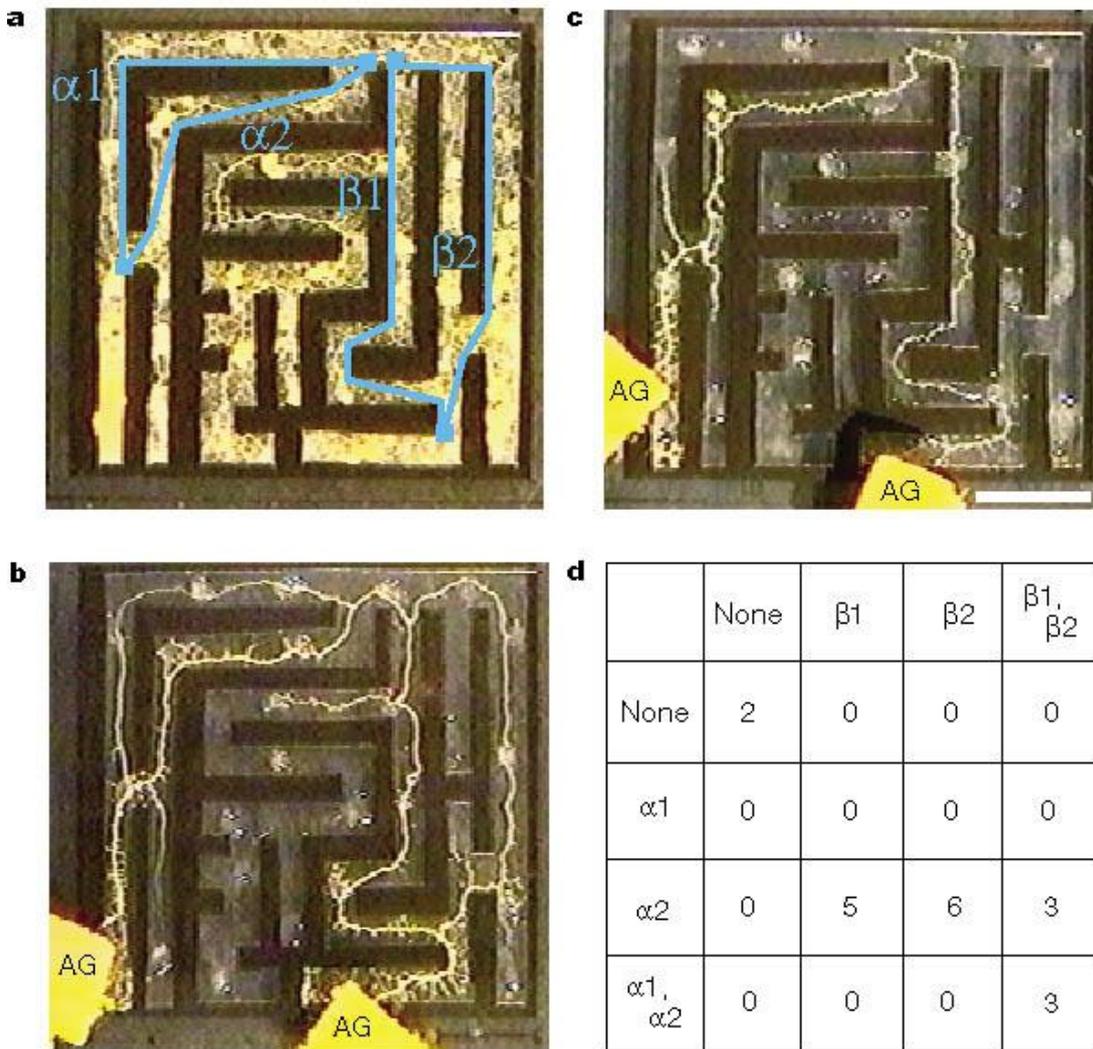


Fig. 41. a, Estructura del organismo antes de encontrar el camino más corto. Las líneas azules indican las rutas más cortas entre dos bloques de agar con nutrientes:  $\alpha 1$  ( $41 \pm 1$  mm);  $\alpha 2$  ( $33 \pm 1$  mm);  $\beta 1$  ( $44 \pm 1$  mm), y  $\beta 2$  ( $45 \pm 1$  mm). b, Cuatro horas después de la creación de los bloques de agar (AG), los callejones sin salida del plasmodio se encogen y los pseudópodos exploran todas las conexiones posibles. c, Cuatro horas más tarde, el camino más corto ha sido seleccionado. Plasmodio peso húmedo,  $90 \pm 10$  mg. Amarillo, plasmodio, el negro, “muros” del laberinto; barra de escala, de 1 cm. d, Camino de selección. Los números indican la frecuencia con que se ha seleccionado cada vía. ‘None’, no hay pseudópodos (tubos) donde se apagan. (Nakagaki, Yamada y Tóth 2000)

Los plasmodios pseudópodos llegaron a los callejones sin salida en el laberinto contrayéndose (Fig. 41b), Finalmente se da la formación de un solo pseudópodo de espesor que abarca la longitud mínima entre los nutrientes que contienen bloques de agar (Fig. 41c). La posición exacta y la duración de la pseudópodo fue diferente en cada experimento, pero el camino a través de  $\alpha_2$  - que fue alrededor del 22% más corta que a través de  $\alpha_1$  - fue seleccionado siempre (Fig. 41d). Sobre el mismo número de tubos formados por  $\beta_1$  y  $\beta_2$  como la diferencia (alrededor del 2%) en longitudes de su camino se pierde en los meandros de la trayectoria del tubo y está dentro del error experimental.

La adición de alimentos conduce a un aumento local de la frecuencia de contracción del plasmodio, iniciando ondas que se propagan hacia las regiones de menor frecuencia. De acuerdo con la teoría de la dinámica de fases. El tubo del plasmodio se refuerza o se desintegra cuando es paralela o perpendicular, respectivamente, a la dirección de la contracción periódicos locales, El tubo final, siguiendo la onda de propagación, se vinculará a los puntos de comida por el camino más corto

Para maximizar su eficiencia de forrajeo, y por lo tanto sus posibilidades de supervivencia, el plasmodio cambia su forma en el laberinto para formar un tubo grueso que cubre la distancia más corta entre las fuentes de alimentos. Este notable proceso de computación celular implica que los materiales celulares pueden mostrar una *inteligencia primitiva*.

En un artículo posterior, Nakagaki (2001a) explica este concepto de “inteligencia primitiva” con estos argumentos:<sup>399</sup>

“Vamos a discutir una vez más las funciones fisiológicas de la forma del cuerpo en un laberinto. Al enlazarse sólo en la ruta más corta entre dos fuentes de alimento, el plasmodio puede entregar gran parte de su propio cuerpo para la fuente de alimento, por lo que la ingesta del nutriente es más eficiente. Por otra parte, ya que el tubo es un flujo de corriente (streaming) de protoplasma, el tubo más corto encabeza el transporte más eficiente del protoplasma. El flujo (streaming) o intercambio intracelular de protoplasma desempeña un papel en la comunicación química en el plasmodio, y por lo tanto la comunicación es lo suficientemente cercana como para mantener el sistema unificado de un individuo. Como vimos anteriormente, el plasmodio puede comportarse de manera correcta, a pesar de la compleja situación de laberinto. ¿Podemos considerar que este comportamiento es inteligente (smart), o algo así como una inteligencia primitiva?

En primer lugar, podemos empezar con la suposición de que los fenómenos biológicos son fenómenos físicos. ¿Cuál es la diferencia entre ellos? En biología, estos fenómenos puramente físicos son a menudo llamadas ‘funciones’, y su importancia biológica es objeto de debate. Me gustaría centrarme en esto. Una función parece ser un concepto que surge solamente cuando una tarea (u objetivo) se ha atribuido a un fenómeno físico

---

<sup>399</sup> Nakagaki, T. (2001a) *Smart behavior of true slime mold in a labyrinth*. Research in Microbiology. Vol.152. pp. 767–770

específico. Si aparece un fenómeno físico y contribuye a la realización de una tarea, ese fenómeno se considera funcional.

A veces sentimos que la tarea más importante de un ser viviente es la supervivencia y la continuación de la especie. Esta es una suposición razonable, ya que observamos sólo el sistema biológico que ya está seleccionado en toda la larga historia de la evolución: hay, sin duda, un gran número de fenómenos físicos que no han sobrevivido a lo largo de los cientos de millones de años de historia de la tierra, y los que vemos que nos rodea hoy en día representan sólo a los sobrevivientes. Por lo tanto, la cuestión reside en cómo un fenómeno puramente físico opera en el mecanismo de supervivencia dentro de un sistema biológico. En otras palabras, aunque los sistemas biológicos no son originalmente diseñados como sistemas de supervivencia (que se producen como resultado de las influencias naturales), podemos encontrar mecanismos de supervivencia en los sistemas biológicos cuando se les observa como el resultado de la evolución.

Este punto de vista puede ser crucial en los estudios de los sistemas biológicos en términos de la física, ya que nos permite distinguir entre la física de los fenómenos biológicos y la biología en términos de la física. En este sentido, el comportamiento de los sistemas biológicos representa una clase especial de fenómenos físicos.

Si el mecanismo de supervivencia funciona bien incluso en situaciones complicadas y difíciles, entonces el comportamiento parece ser inteligente. Ya hemos visto cómo el comportamiento de la *Physarum* era funcional, incluso en el laberinto. Por lo tanto, Nakagaki considera que la resolución del laberinto del *Physarum* es inteligente o algo semejante a una inteligencia primitiva. Por otra parte, en consonancia con la actual discusión sobre el comportamiento inteligente, todos los sistemas biológicos deben ser bastante inteligentes. No se sabe aún cuán inteligentes son los microorganismos. De hecho, la inteligencia del *Physarum* puede ser más complicada que una simple resolución de laberinto, porque la vida en la naturaleza es más complicada y difícil. Por ejemplo, el plasmodio puede construir una compleja red de tubos para conectar varias fuentes de alimentos que se distribuyen al azar en una superficie de agar. La geometría de esta red es bastante eficiente y bien diseñada, pero no puedo evaluar cómo funciona para la supervivencia de *Physarum*. Por lo tanto, es imposible entender cómo se encuentran comportamientos inteligentes en una situación tan complicada.”

### **La retroactividad no refleja como fenómeno cognitivo**

El mecanismo de solución de laberinto está relacionado con la propagación de la onda de la contracción rítmica. Cuando la actividad contráctil se propaga como una onda a través del plasmodio, la estructura tubular se desarrolla y crece a lo largo de la dirección de propagación de las ondas. Por otra parte, en la dirección perpendicular a la dirección de propagación, el tubo se retrae y desaparece. Las ondas de contracción rítmica median la formación de la red de tubos.

En el plasmodio que se mantiene en el laberinto, se propagan las ondas de contracción entre dos fuentes de alimentación: la fuente de las ondas se activa desde una fuente de

alimento a otra cada varias ondas. Las partes del plasmodio en callejones sin salida del laberinto se contraen sincrónicamente. Este patrón de contracción significa que hay partes sin salida del plasmodio que se encogen y que los tubos que conectan las fuentes de alimento crecen. Entonces, el problema que queda es cómo la forma más corta del tubo es seleccionada entre todas las conexiones posibles.

No tan sólo podemos encontrar la inteligencia primitiva en el encuentro con el camino más corto para conseguir el alimento. El fenómeno contráctil del tubo en las zonas sin salida del laberinto es una toma de decisión que hay que tener en cuenta a la hora de priorizar la maximización de la alimentación de todas las partes del plasmodio. Contribuye al aumento de la dimensión del tubo final y permite la asimilación de los nutrientes a los cientos de miles de núcleos que estaban “perdidos” en el laberinto junto con el protoplasma. Este fenómeno. Uexküll lo denominó “*Antitipia*” si lo recordamos en el capítulo de los antecedentes históricos de la biología cognitiva. La “Antitipia es el fenómeno de la “*Anticlisis*” o “*Rückwirkung*” es decir, “retroactividad” o mejor dicho “retroalimentación negativa” en los organismos protoplasmáticos. Lo expongo aquí como conato del fenómeno biológico que Uexküll distinguió de las denominadas retroactividades reflejas y que, al no considerarlo un efecto mecánico de retroacción, por su carácter pausado en el tiempo – en el tiempo o “frame” del propio organismo se entiende, a diferencia de la refleja que siempre es rápida – constituye un ejemplo claro de principio mínimo cognitivo plausible. Recordemos que Uexküll, Bethe y Beer (1899) explican que después de un estímulo, si se van acumulado impresiones de forma repetitiva en estos u otros estímulos anticinéticos diferentes, entonces se produce lo que llama “remanencia del estímulo”; es decir, lo que subjetivamente comprendemos como “memoria de estímulo” Actualmente esto es un factor de estudio para la definición de “proceso cognitivo” y su comprensión epistémica más allá de los comportamientos tróficos. Veamos otro ejemplo de reflejar este fenómeno en las investigaciones de Nakagaki.

En este proceso de la trayectoria de investigación de la solución a la prueba del laberinto se le atribuye a un mecanismo fisiológico subyacente: se espesa el tubo así como el flujo aumenta a través de ella. La evidencia experimental para ello es, sin embargo, sólo cualitativa. Kakagaki y sus colegas (Tero, Kobayashi y Nakagaki 2006) crearon un modelo matemático de la forma general de la dinámica del tubo. Dicho modelo contiene un parámetro clave que corresponde a la extensión de la regulación de la retroalimentación entre el grosor de un tubo y el flujo a través de él. Se demuestra de este modo la dependencia del comportamiento del modelo sobre este parámetro.

Existen dos reglas empíricas para describir los cambios en la estructura tubular del plasmodio: en primer lugar, la regla de composición abierta, es decir, tubo que no está conectado a una fuente de alimentación (FS), tienden a desaparecer, en segundo lugar, cuando dos o más tubos conectan con dos o más fuentes de alimentación, los tubos más largos tienden a desaparecer. Estos cambios están estrechamente relacionados con la dinámica espacio-temporales de los ritmos celulares.

Las estructuras tubulares se forman en una dirección específica cuando se transmite de traslados del protoplasma, impulsado por la presión hidrostática debido a las contracciones rítmicas, persiste en esa dirección durante un cierto período (Nakagaki, Yamada y Ueda 2000). Este resultado experimental se puede explicar a nivel molecular. Las fibras de actomiosina están dispuestas a lo largo de la corteza de un tubo, formando la estructura básica del tubo. Este fenómeno se conoce como el efecto de la activación de estiramiento (Kamiya 1959; Nagai, Yoshimoto y Kamiya 1978) y es una propiedad natural de las moléculas fibrosas.

Esto implica que si hubiera una fuerza de estiramiento en el organismo, podría actuar para organizar las estructuras tubulares. Un ejemplo es la tensión tangencial ejercida por la rápida corriente protoplasma (1 mm / s). La magnitud estimada de la tensión tangencial es lo suficientemente grande como para producir la activación de estiramiento. En resumen, entonces, puede ser la hipótesis de que el esfuerzo cortante que ejerce el flujo de protoplasma induce el efecto de estiramiento, que a su vez conduce a la orientación regular de las fibras actomiosina como marco básico de los tubos. ¿Qué significa esto para la regulación de la formación del tubo? La respuesta está en el control de retroalimentación positiva entre el flujo y el espesor del tubo.

El plasmodio se compone de dos partes: una sección “esponja” que incluye fibras de actina-miosina distribuidos y un “tubo” formado por la sección de fibras de actina-miosina. Como se ilustra en La figura. 42, La solución protoplasmática en la sección de esponja entra y sale de la sección del tubo.

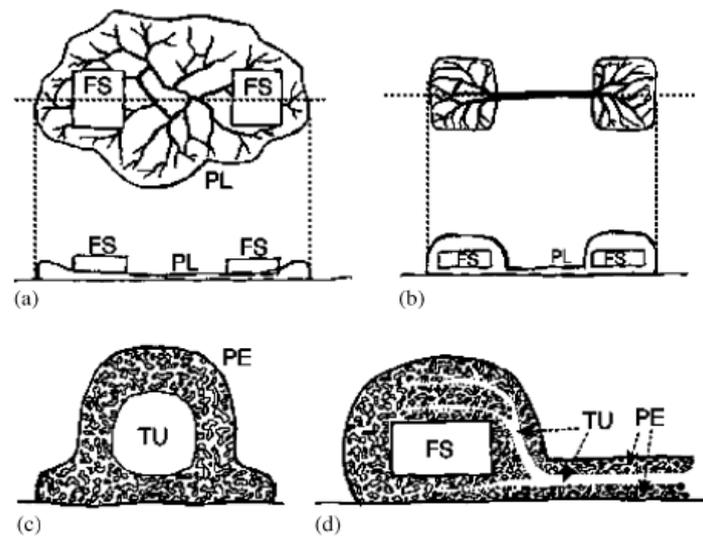


Fig. 42. Ilustración esquemática de los cambios en la estructura celular en respuesta a la alimentación. (a) Al principio, el plasmodio (PL) tiene una forma cuasi elíptica y las fuentes de alimentos (FSs) se colocan en el PL en dos lugares. (b) El plasmodio luego se reúne alrededor de la FSs, conectándolas a través de un tubo de espesor. La forma se asemeja a una mancuerna. El panel (c) da una vista en sección transversal del tubo de espesor se muestra en (b). El sol fluye a través de los canales tubulares (TU), que se componen de las fibras de actina-miosina (PE o parte esponja). (d) Las fibras de actina-miosina de toda las FSs exhiben contracciones rítmicas y empujan el sol (la solución) en el tubo. Fuente: (Tero, Kobayashi y Nakagaki 2006)

El tubo se ensancha suficientemente con el flujo. Esto conduce a un mayor aumento de flujo debido a la resistencia al flujo de las disminuciones de sol en el canal más amplio. Por lo tanto, los tubos con un gran flujo crecen, mientras que las de un flujo pequeño desaparecen. Es evidente que este comportamiento dinámico del diámetro del tubo es autocatalítico. En otras palabras, la red tiene la capacidad de adaptarse a las variaciones de flujo.

Ahora bien, el flujo en el tubo no es unidireccional, la dirección del flujo se puede observar cómo alterna. Estos cambios periódicos en la dirección que se conoce como streaming o flujo de corriente de traslados protoplasma estudiados por Kamiya, como hemos visto anteriormente. Cuando las fuentes de alimentación (FSs) se presentan al organismo, las oscilaciones están fuera de fase entre un FS y su tubo vecino. Esto significa que la solución en la FS entra y sale del tubo. Cuando hay dos FSs, los dos de ellos empujar la solución, a veces en la fase y, a veces fuera de fase. En cualquier caso, el sol o solución se intercambia entre los dos FSs durante largos periodos de tiempo: incluso en oscilación en fases, los flujos de sol pasa a través del tubo entre las fuentes de alimentación FSs, porque la base de referencia y la amplitud de la oscilación de presión son diferentes entre sí. Por lo tanto es razonable suponer que, en un momento dado, una FS es la fuente y el otro el disipador del flujo de sol. Por otra parte, se supone que sólo el componente del organismo en el FS puede generar presión, y que el tubo es un elemento pasivo, ya que la mayoría del organismo se encuentra sobre el FSs y produce la fuerza mecánica sincronizada en cada FS.

Estudiando los modelos matemáticos de flujos, a través de la ecuación de Poiseuille<sup>400</sup>, y resolviendo el fenómeno de adaptación a través de ecuaciones adimensionales para llegar a que la ecuación implica que la conductividad tiende a desaparecer si no hay flujo a lo largo del borde, mientras que se ve reforzada por el flujo.

Nakagaki llega a la conclusión que la conductividad está estrechamente relacionada con el grosor del tubo. Por lo tanto, la desaparición de los tubos se expresa por la extinción de la conductividad de los bordes. Durante la evolución del sistema de modelos, algunos bordes crecen o permanecen, mientras que otros desaparecen. Consideramos que nuestro sistema ha resuelto el laberinto cuando los bordes restantes forman un camino (o caminos) que conecta los dos nodos o bloques de agar con el copo de avena.

Debido a que el flujo total se mantiene constante, no es, en cierto sentido, una competición entre los bordes con cada uno luchando por obtener más flujo. Está claro que la retroalimentación positiva está incluida en nuestras ecuaciones del modelo, ya que es una función creciente. Sin embargo, no es fácil predecir cómo evoluciona el sistema. Por ello se realiza una simulación por ordenador de la solución del laberinto.

---

<sup>400</sup> Ecuación que responde a una ley que permite determinar el flujo laminar estacionario de un líquido incompresible y uniformemente viscoso (también denominado fluido newtoniano) a través de un tubo cilíndrico de sección circular constante. La ley de Poiseuille tiene aplicación en la ventilación pulmonar al describir el efecto que tiene el radio de las vías respiratorias sobre la resistencia del flujo de aire en dirección a los alveolos. Fuente: Wikipedia®

Vamos a describir simulaciones usando las ecuaciones del modelo a la adopción de la función de tipo I:  $f(Q) = Q^\mu$  y tipo de funciones II:  $f(Q) = (1 + a)Q^\mu / 1 + aQ^\mu$ . En el tipo II, el parámetro  $\mu$  toma en el rango  $\mu > 1$  para mantener el perfil sigmoidal como se indica en la figura. 43 (b).

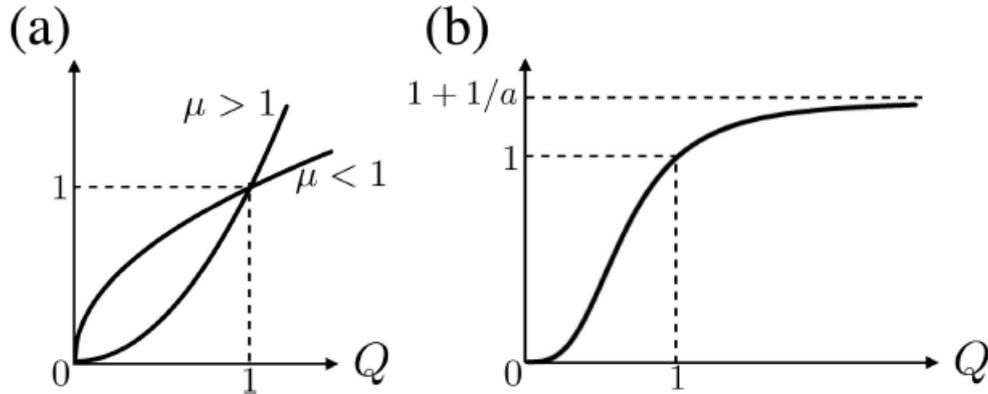


Fig. 43. (a) Ilustración de la gráfica de la función de tipo I:  $f(Q) = Q^\mu$  ( $\mu > 0$ ) (b) la ilustración de la gráfica de la función Tipo II:  $f(Q) = (1 + a)Q^\mu / 1 + aQ^\mu$  ( $\mu > 1$  y  $a > 0$ ). Tenga en cuenta que el valor  $f(1) = 1$  mantiene, por definición funciones adimensionales.

Hemos utilizado la función sigmoidal (función tipo II) para una relación de flujo de la conductancia como una forma más realista que la función de potencia (función tipo I). La observación de que hay un tubo de diámetro máximo motiva claramente que la función de crecimiento debe saturarse, cualquiera que sea el mecanismo causante de la saturación. Esta observación hace que la forma funcional del tipo de crecimiento II sea una función de una modificación razonable de la función de crecimiento de ley de potencia. Asumimos que el flujo es proporcional a la diferencia de presión, pero la tixotropía<sup>401</sup> (una característica de fluido no-newtoniano)<sup>402</sup> del protoplasma significa que apenas corría cuando la diferencia de presión era pequeña. Sin que se entre en la reología<sup>403</sup> compleja del protoplasma, hay que tener en cuenta esta observación en nuestro modelo, tomamos  $\mu > 1$  en la ley de crecimiento de tipo II con el fin de que el crecimiento es menos sensible a los cambios en el flujo cuando las diferencias de presión son pequeñas.

<sup>401</sup> Tixotropía es la propiedad de algunos fluidos no newtonianos que muestran un cambio dependiente del tiempo en su viscosidad; cuanto más se someta el fluido a esfuerzos de cizalla, más disminuye su viscosidad. Un fluido tixotrópico es un fluido que tarda un tiempo finito en alcanzar una viscosidad de equilibrio cuando hay un cambio instantáneo en el ritmo de cizalla. La palabra viene del griego thixis, tacto. Fuente: Wikipedia®

<sup>402</sup> Un fluido no newtoniano es aquel fluido cuya viscosidad varía con la temperatura y la tensión cortante que se le aplica. Como resultado, un fluido no newtoniano no tiene un valor de viscosidad definido y constante, a diferencia de un fluido newtoniano.

Aunque el concepto de viscosidad se usa habitualmente para caracterizar un material, puede resultar inadecuado para describir el comportamiento mecánico de algunas sustancias, en concreto, los fluidos no newtonianos. Estos fluidos se pueden caracterizar mejor mediante otras propiedades reológicas, propiedades que tienen que ver con la relación entre el esfuerzo y los tensores de tensiones bajo diferentes condiciones de flujo, tales como condiciones de esfuerzo cortante oscilatorio. Fuente: Wikipedia®

<sup>403</sup> Rama de la física de medios continuos que se dedica al estudio de la deformación y el fluir de la materia.

La curva sigmoïdal tiene consecuencias fisiológicas. El control de la forma del cuerpo del organismo en respuesta al volumen de alimentos disponibles sigue una regla previamente establecida: el número de rutas restantes es mayor cuando se proporciona menos alimento para una cantidad fija de inóculo plasmodial.<sup>404</sup> (véase Nakagaki, Yamada y Tóth 2001, para más detalles). Este comportamiento se considera equilibrio entre las necesidades fisiológicas de avanzar hacia las fuentes de alimentación FSs para consumir la comida y la conexión de las dos las fuentes de alimentación para mantener la comunicación intracelular. Cuando la cantidad dada de alimentos es pequeña, sólo una pequeña cantidad de plasmodio cubre la comida y más plasmodio se dedica a realizar las conexiones, lo que hace que el flujo total de sol sea más grande. Nuestra simulación con la función sigmoïdal podía darse cuenta de la situación en la que varias rutas de acceso permanecen para un flujo total más grande. Por consiguiente, concluimos que la relación sigmoïdal entre sol de flujo y el espesor del tubo explica el control inteligente de la conducta ameboide en *Physarum*.

El modelo propuesto por Nakagaki y colegas sugiere cómo el *Physarum polycephalum* resuelve un problema para completar una tarea necesaria para su supervivencia. Los comportamientos dinámicos del plasmodio, simulado en este modelo – asevera Nakagaki – “*puede considerarse como un medio de procesamiento de la información en ausencia de un sistema nervioso*”. Un mecanismo de retroalimentación positiva – el fenómeno que Uexküll y colegas describieron en 1899 como “*antitipia*” – entre la conductancia del flujo de sol (o espesor del tubo) y el flujo de sol desempeña un papel clave. Actualmente no está claro cómo este mecanismo de retroalimentación se realiza en el plano material del sol y gel protoplásmico. Sin embargo, es posible concluir que este sistema no requiere una unidad de procesamiento central, sino que la dinámica en paralelo dentro de cada parte del protoplasma es suficiente para cubrir sus necesidades de procesamiento de información. Nakagaki afirma que “*el algoritmo del Physarum polycephalum para la resolución de problemas es de particular interés cuando se considera el origen evolutivo de procesamiento de la información por el cerebro*”. El *Physarum* es un sistema modelo útil para estudiar la aparición de procesamiento de la información en términos físicos y de su red de tubos ayuda a explicar cómo la auto-organización de redes de transporte adaptativo se desarrolla en la naturaleza.

Podemos de momento entrever que los mixomicetos actúan de manera que procesan la información de la localización de las fuentes de alimentación sin tener ningún loci centralizado de procesamiento, y que su dinámica de osciladores acoplados para ramificaciones múltiples (mayores de tres) conjugan un papel de equivalencia homeomórfica a un sistema nervioso en tanto que los organismos primitivos protistas pueden jugar un papel modelador de procesos de células incluídas en una dependencia jerárquica de sistemas vivos complejos, como una neurona o una glia, por ejemplo. Justamente la descentralización del procesamiento de información es el factor que define la fisiología tanto de los mixomicetos como del sistema nervioso.

---

<sup>404</sup> Suspensión de microorganismos que se transfieren a un ser vivo o a un medio de cultivo a través de la inoculación.

## Memoria y anticipación en el Physarum

Nakagaki afirma que el procesamiento de la información es un componente interesante de los sistemas biológicos. Aunque el cerebro ha evolucionado para realizar esta función específica, procesamiento de la información es posible sin un cerebro, y organismos tan simples como las amebas son mucho más inteligentes de lo que generalmente se piensa. Por lo tanto, desde una perspectiva evolutiva, el procesamiento de la información por los organismos unicelulares podría representar un sencillo precursor de funciones superiores dependientes del cerebro. Anticipar y recordar eventos son dos de dichas funciones; sin embargo, la forma en que se auto-organizan se ha mantenido hasta ahora desconocido. Con el fin de investigar las formas primitivas de la función cerebral (como el aprendizaje, la memoria, la anticipación, y el recuerdo), Tetsu Saigusa, Atsushi Tero, Toshiyuki Nakagaki y Yoshiki Kuramoto (2008) examinaron la ritmicidad de comportamientos celulares y la capacidad de adaptación de las células a los cambios ambientales periódicos exponiendo al mixomiceto a los cambios periódicos en condiciones ambientales y observaron sus respuestas conductuales. De este modo mostraron que un organismo ameboide puede anticipar la sincronización de eventos periódicos. Además, exploraron los mecanismos que subyacen a este comportamiento desde una perspectiva de sistemas dinámicos. Los resultados apuntan a los orígenes celulares de inteligencia primitiva, e implican que la simple dinámica puede ser suficiente para explicar su emergencia.

Cultivaron<sup>405</sup> un gran plasmodio de *Physarum polycephalum* con copos de avena en un canal ( $25 \times 35 \text{ cm}^2$ ) dentro de una placa de agar con poca luz. La región de la punta de un frente amplio fue retirado y colocado en un carril estrecho ( $0,5 \times 28 \text{ cm}^2$ ) a  $26^\circ\text{C}$  y 90% de humedad (en adelante denominado condiciones estándar; todos los experimentos se llevaron a cabo bajo estas condiciones ambientales menos que se especifique lo contrario). El organismo emigró a lo largo del carril, y la posición de la punta era medida cada 10 min. Después se le permitió la migración durante unas pocas horas, y se cambiaron las condiciones ambientales a más fresco ( $23^\circ\text{C}$ ) y seco (60%) (referido como “estimulación seca”) durante 10 min como se muestra en Fig. 42 (a). Esta estimulación seca se repitió 3 veces en varios intervalos de  $\tau$  (los valores de  $\tau$  testeados fueron de 30, 40, 50, 60, 70, 80, y 90 min). Los experimentos descritos anteriormente se realizaron en una incubadora y fueron controladas la temperatura y la humedad. El organismo se mueve a lo largo del carril fue iluminado desde abajo por una matriz de luz infrarroja y fue visto con un dispositivo de carga acoplada (CCD). La ventana de la

---

<sup>405</sup> Vamos a describir íntegramente el desarrollo de este estudio de Nakagaki, Saigusa y Tero sobre la memoria y anticipación del plasmodio, por un interés fundamental en el desarrollo de una aplicación de dinámica cooperativa compleja de alto valor de estudio tanto para resolver la dinámica de osciladores acoplados a larga distancia para una conducta sinérgica del *Physarum*, como para la dinámica de redes neuronales. Este esfuerzo de atención en la física-matemática utilizada en dicho experimento unifica los fundamentos no sólo físicos de ambas aplicaciones estudiadas, sino que cohesiona el discurso de capítulos anteriores de los principios mínimos cognitivos, tanto en los sistemas neurales como en organismos carentes de sistema nervioso. Saigusa, T., Tero, A., Nakagaki, T., Kuramoto, Y. (2008) *Amoebae Anticipate Periodic Events*. Physical Review Letters, Vol. 100, Nº 1, 018101.

incubadora se cubrió con un filtro de absorción de calor para transmitir sólo la luz infrarroja, de modo que el material experimental se mantuviese en la oscuridad.

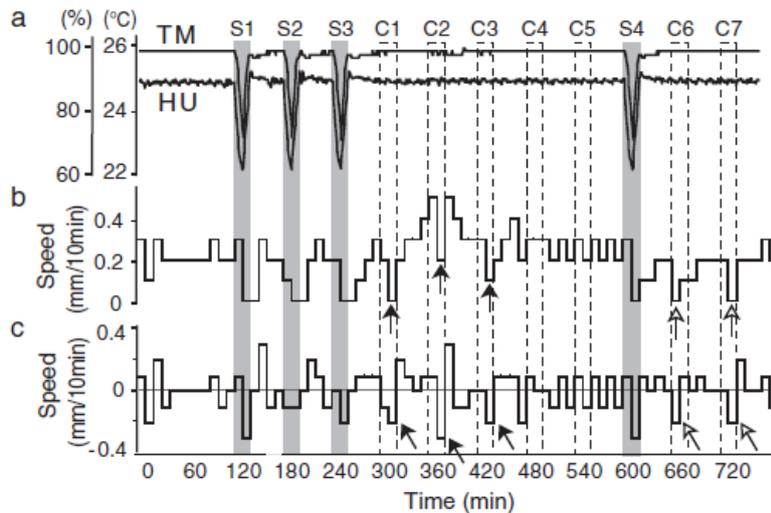


Fig 44. Respuestas de fase en desaceleración espontánea SPS y de fase en desaceleración espontánea después de una desaparición SPSPD. Curso típico de tiempo de locomoción para un organismo (peso húmedo = 15 mg) antes y después de tres aplicaciones periódicas (S1, S2, y S3) y una sola aplicación (S4) de la estimulación seca. (a) La temperatura se representa por la línea superior (TM) y la humedad por la línea inferior (HU). (b) La velocidad de locomoción calculada en intervalos sucesivos de 10 min. (c) Aceleración ( $\Delta$  velocidad) definida como la diferencia de velocidad entre intervalos sucesivos en (b). S1, S2, S3, y S4 indican los puntos de tiempo de los estímulos reales, mientras que C1, C2,..., C7 indican los puntos de tiempo de las estimulaciones virtuales. La respuesta SPS fue inducida en el punto de tiempo de C1, C2, y C3 por la estimulación periódica (flechas en negrita), y en C6 y C7 punto de tiempo por la estimulación de disparo en S4, después de desaparecer una vez (flechas en blanco).

Las figuras 44(a)-44(c) muestran un curso de tiempo típico de la velocidad de locomoción y la aceleración, junto con la temperatura y humedad. La velocidad de locomoción disminuyó durante los períodos de estimulación seca ( $\tau = 60$  min) en puntos de tiempo S1, S2, y S3. Después de la estimulación seca, se mantuvieron las condiciones estándar. Sin embargo, el movimiento se desaceleró de forma espontánea en puntos de tiempo C1, C2, y C3 [flechas en negrita en las Figs. 44 (b) y 44 (c)], que coincidió con los momentos de la hora cuando el habrían ocurrido próximos períodos de estimulación seco. Esta disminución de la locomoción, que se conoce como *fase en desaceleración espontánea* (SPS), producido en la primera y segunda puntos de tiempo después de la última estimulación seca verdadera La figura 43 muestra los resultados de los análisis estadísticos de la SPS, lo que indica la velocidad media [Fig. 45 (a)] y la aparición estadística de desaceleraciones [Fig. 45 (b)], calculado sobre 43 repeticiones. La velocidad de locomoción se redujo significativamente en la primera instancia de la estimulación seca virtual. SPS fue evidente en este momento de la evolución en el tiempo promedio, y el análisis reveló las SPS en C1 más claramente [flecha negra en la Fig. 45 (a)]. Los pesos en húmedo inicial de los organismos en la Fig. 43 eran 10 a 19 mg. El plasmidio más pequeño, en el rango de 5-10 mg de peso húmedo, eran más

sensibles a la estimulación seca, y aquellos por debajo de 5 mg de peso húmedo podría verse seriamente dañada por el mismo. La respuesta SPS era dependiente tanto, sobre el tamaño del plasmodio.

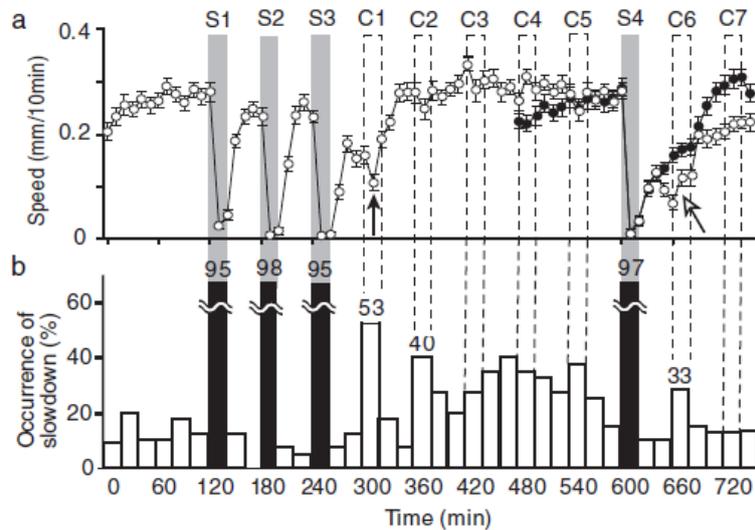


Fig. 45. El análisis estadístico de las respuestas SPS y SPSD en términos de velocidad media con el error estándar (a) y la estadística de la aparición de desaceleración espontánea (b). La velocidad media se calcula a partir de 43 ejemplos para el grupo de prueba (círculos blancos), y de 39 muestras para el grupo de control sin estimulación periódica en avance (círculos negros). Puntos S1-S4 indican los tiempos de los estímulos reales, mientras que los puntos C1-C7 indican los tiempos de los estímulos virtuales. La respuesta SPS se indujo a C1 por la estimulación periódica (flecha negra), y en C6 por la estimulación desencadenada en S4, después de desaparecer una vez (flecha blanca). Los organismos tenían pesos que van desde 10 a 19 mg.

A continuación, el valor  $\tau$  de los cambios ambientales se varió de 30 a 90 min. La figura 44 muestra las ocurrencias estadísticas de SPS en estas condiciones. A  $\tau = 60$  min, SPS se exhibió una vez por un 30% de los organismos, dos veces en un 20%, y 3 veces por un 10%, mientras que el 40% de los organismos no pudo someterse a SPS. Las instancias de SPS eran evidentes para todos los valores de  $\tau$  testeados. La frecuencia global de SPS fue de aproximadamente de un 40% -50%, y esta cifra era más o menos similar para todos los períodos. Los períodos de tiempo más corto que 30 minutos o más de 90 min no fueron probados debido a las limitaciones técnicas del sistema experimental.

Después de unos pocos casos de SPS en  $\tau = 60$  min, la velocidad de locomoción fluctuó y no se observó más SPS. Sin embargo, como se muestra en la Fig. 43, SPS reapareció en C6 y C7 [flechas blancas en figuras. 43 (b) y (c)] en respuesta a una sola estimulación seco a S4. Este fenómeno se conoce como *fase en desaceleración espontánea SPS después de una desaparición* (SPSD). SPSD era examinados a través de un análisis estadístico de la velocidad media [Fig. 45(a)] y la ocurrencia de desaceleración [Fig. 45(b)]. El acontecimiento de SPSD se observó claramente [flecha blanca en la Fig. 45(a)]. Cuando el punto de S4 tiempo se varió de 420 min a 600 min,

los acontecimientos de desaceleración en la primera estimulación virtual después de la estimulación desencadenante en S4 eran del 63% (S4 en 420 min), 39% (480 min), 40% (510 min), 39% (570 min), y 33% (600 min). En todos los puntos de tiempo ensayados, SPSD fue significativa. Tenga en cuenta que los puntos de tiempo de 510 min y 570 min son anti-fase de la estimulación periódica previa. Este SPSD se observó a  $\tau = 60$  min, pero no 40 min y 80 min. La respuesta SPSD fue así limitada a un período específico.

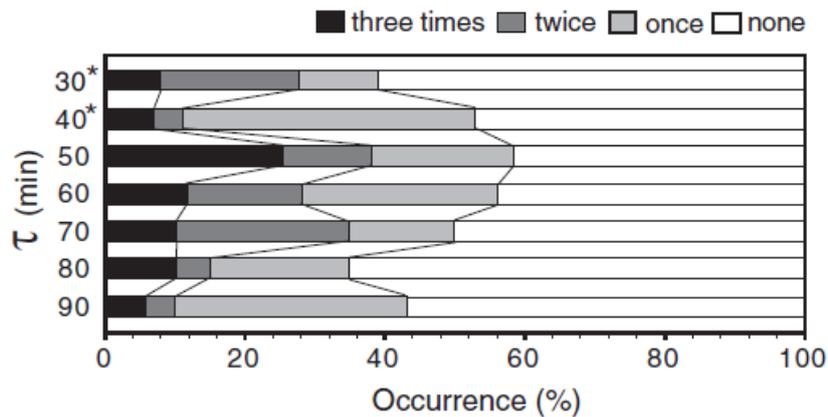


Fig 46. Respuestas de la fase en desaceleración espontánea SPS sobre una gama de períodos de estimulación ( $\tau$ ). Los niveles de barras indican el número de apariciones de SPS: las barras en negro denota tres, las barras en gris oscuro denota dos, las barras en gris claro denota una, y las barras en blanco denota ninguna. Los criterios en dos apariciones de SPS fueron que no debe haber una evolución unimodal de la velocidad de la locomoción entre la última estimulación y el momento de la subsiguiente estimulación virtual, y que la velocidad de locomoción mínima debe producirse en el momento de esta estimulación virtual. Cursos de tiempo bimodales y las fluctuaciones de la velocidad de locomoción se observan a menudo, y eran considerados como una ausencia de SPS, así como los casos en los que la velocidad mínima se produjo un poco antes o después de la estimulación virtual. \*: Estimulación en seco en 26 C y 70% de humedad, lo cual es un estímulo más débil que en todos los demás casos. Número de repeticiones ( $\tau$  min): 36 (30), 46 (40), 24 (50), 121 (60), 20 (70), 20 (80), y 19 (90).

Nakagaki y colegas han desarrollado un modelo de sistema dinámico que reproduce los fenómenos observados. La figura 47 muestra una simulación de modelo y de ilustración esquemática de los comportamientos. El modelo se basa en observaciones. Fisiológicamente se supone que los múltiples osciladores químicos de una serie de períodos subyacen a la multiritmicidad de locomoción, como se observaron múltiples ritmos en las actividades celulares en un plasmodio *Physarum*. Estos movimientos celulares mostraron una  $(\text{frecuencia})^{-1}$  – propiedad tipo de densidad espectral de potencia en un rango de frecuencia de 1 s a 24 horas. Esto significa que hay frecuencias continuas de oscilación. Si se descuidan las variaciones de potencia (amplitud) a través de la gama de frecuencias, estos podrían ser descritos por osciladores de fase simples del tipo  $d\theta_{i,j}/dt = \omega_j$  ( $0 \leq \theta < 1$ ), donde  $\theta_{i,j}$  es la fase de un oscilador de una frecuencia  $\omega_j$ . La multiritmicidad se muestra en una pequeña parte del protoplasma se modela por una colección de osciladores con diferentes períodos indicados por  $j$ .

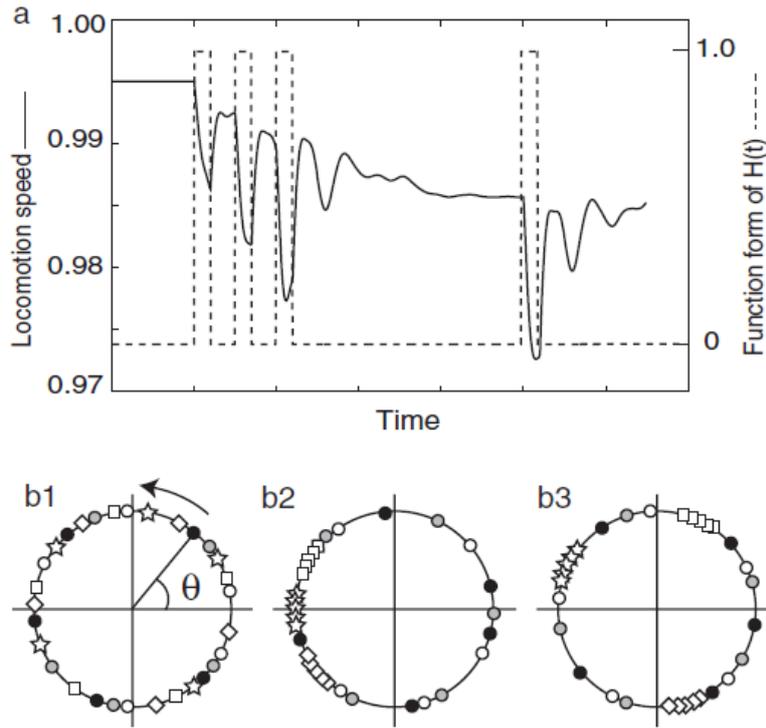


Fig. 47. Simple modelo de dinámica y simulación de respuestas SPS y SPSD. (a) La simulación de la variación de la locomoción de velocidad  $S$  con el tiempo (línea de color negro), y la forma en función de  $H(t)$  (Línea discontinua). (b) Esquema de los modelos de comportamiento. Muchos osciladores con frecuencias diferentes (los mismos símbolos denotan las mismas frecuencias) giran en sentido antihorario en el anillo en el espacio de estado atravesado por dos tipos de especies químicas que no están especificados y podrían ser cualquier producto químico. En las condiciones iniciales de la fase? del oscilador se distribuye al azar; no se observa ningún movimiento coherente, de modo que la velocidad de locomoción  $S$  es casi uno (b1). Después de perturbaciones periódicas de la frecuencia  $\omega_{ext}$  se aplican a todos los osciladores, las múltiples osciladores con  $\omega_j = \omega_{ext}$  (estrellas blancas) tienden a sincronizar porque son empujados hacia la izquierda en el anillo durante la perturbación (b2). Esta sincronización se observa en los osciladores con cada frecuencia de  $\omega_j \approx \omega_{ext}$  (cuadrados blancos y los diamantes blancos). En este punto,  $S$  muestra variaciones periódicas claras con la misma frecuencia que las perturbaciones externas, y este estado se mantiene hasta que los osciladores coherentes desincronizan en fase, debido a las diferencias entre sus frecuencias intrínsecas  $\omega_j$  (b3). Tenga en cuenta que los grupos de osciladores de la misma frecuencia permanecen sincronizados, aunque  $S$  no muestra ningún comportamiento periódico claro. Cuando se aplica de nuevo la perturbación, los grupos de oscilador de la misma frecuencia tienden a sincronizar en fase, de modo que  $S$  muestra de nuevo un comportamiento periódico (b2).  $\omega_j = 0,1; 0,11; 0,12; 0,13; \dots, 4,49; 4,50; N = 1000; \alpha = 0,5; -0,01 < \zeta < 0,001$ .

Como el plasmidio consta de una gran cantidad de protoplasma, debe haber muchos osciladores numerados  $i$  en cada frecuencia  $\omega_j$ . Para este grupo oscilador para responder a la estimulación seca periódica externa, la dinámica se pueden escribir como

$$\frac{d\theta_{i,j}}{dt} = \omega_j + \alpha H(t) \sin(2\pi\theta_{i,j}) + \xi_{i,j}, \quad (1)$$

donde el segundo y tercer término de la derecha son la estimulación periódica y ruido aleatorio, respectivamente, y  $H(t)$  es responsable de la expresión de una periodicidad  $\omega_{\text{ext}}$  como se muestra en la Fig. 46 (a). Como  $H(t) = 1$  en presencia de estimulación seco a menos que de otro modo  $H(t) = 0$ . El segundo término de la estimulación periódica actúa para reducir  $\cos\theta$  cada vez que  $H(t) = 1$ , de modo que se supone que el nivel de actividad de locomoción a ser proporcional a  $\cos\theta$ .

La actividad total  $S$  de la locomoción sobre un organismo entero depende entonces de la suma de las oscilaciones como

$$S = \sum_j \tanh\left(2 \sum_i \frac{\cos 2\pi\theta_{i,j}}{N} + 3\right), \quad (2)$$

donde  $\tanh$  proviene de la observación experimental de que la velocidad de locomoción se satura a altas concentraciones intracelulares de algún componente químico importante. Ambas respuestas SPS y SPSD son reproducidos por las ecuaciones del modelo, como se muestra en la Fig. 47 (a).

La actividad total de la locomoción  $S$  no muestra ninguna variación oscilatoria ante una sencilla estimulación desencadenadora aplicada, ya que es similar al estado antes de la estimulación periódica. Sin embargo, el estado interno del colectivo de osciladores es diferente como persisten algunos grupos coherentes de osciladores, tal como se muestra en la Fig. 47 (b3). A pesar de que la aparición de la actividad total es similar, es posible generar un estado interno diferente dentro del sistema. También se predice teóricamente que la relajación de la actividad total no siempre implica la descomposición del estado interno; en una gran población de osciladores acoplados, la descomposición del estado interno requiere de un tiempo mucho más largo que la relajación de la actividad total (Kuramoto y Nishikawa 1988)<sup>406</sup>. Aunque el modelo de Nakagaki, Saigusa y Tero y no es idéntico al modelo analizado por Yoshiki Kuramoto e Ikuko Nishikawa, los comportamientos descritos anteriormente se asemejan modelo la predicción teórica. El orden oculto del estado interno podría desempeñar un papel clave en la auto-

---

<sup>406</sup> El tipo de sistemas complejos de nuestra preocupación actual es una gran población de osciladores de ciclo limitado, junto con la distribución de frecuencias. Estos sistemas no son en absoluto una invención motivada simplemente por la curiosidad matemática. Muy por el contrario, su estudio sería de considerable valor práctico, para el mismo tipo de sistemas no son raros en el mundo real como nos damos cuenta cuando se busca en los organismos vivos. Y. Kuramoto and I. Nishikawa se centraron en la “frecuencia de condensación” por lo que entendemos que las frecuencias naturales cambian de distribución continuamente con la fuerza de acoplamiento mutuo hasta que finalmente una fracción finita de la población llega a compartir una frecuencia común. Este comportamiento notable podría ser el origen de oscilación colectiva, es decir, la oscilación de toda una población como un solo oscilador gigante. El mismo comportamiento haría posible para la sincronización de las ondas para propagar con sorprendente robustez sobre largas distancias de una forma arbitraria, lo que podría ser importante en el procesamiento de información en los sistemas vivos, sobretodo en reden neurales. Kuramoto, Y, Nishikawa, I (1988) *Onset of Collective Rhythms in Large Populations of Coupled Oscillators*. En: H. Takayama (ed) *Cooperative Dynamics in Complex Physical Systems*, Volume 43 de Springer Series in Synergetics. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1989, pp. 300-306.

organización de SPS y SPSD observado en el organismo real. Por lo tanto, SPS y SPSD pueden explicarse por estas dinámicas simples.

Cabe señalar que nuestro modelo no involucra interacciones entre los osciladores. El ruido aleatorio  $\xi_{i,j}$  no es necesario para reproducir respuestas SPS y SPSD, pero se necesita para restablecer el sistema, con el fin de tener en cuenta el hecho de que no muestra las respuestas de SPS y SPSD un largo tiempo después de la última estimulación seca.

El supuesto más crítico, es decir, que la frecuencia natural  $\omega_j$  se distribuye casi continuamente en un amplio rango, se puede justificar por el supuesto más realista que la distribución real de frecuencia se compone de varias frecuencias principales discretos con desviaciones que se solapan las frecuencias principales vecinos. Cada una de las principales frecuencias corresponde a un modo de oscilación bioquímica específica. Esta imagen también explica por qué los osciladores de la misma frecuencia deben ser resumidos antes de sumar las diferentes frecuencias.

Osciladores con la misma identidad bioquímica pueden interactuar sobre una distancia por difusión química y advección<sup>407</sup> activa del flujo de corriente o streaming de protoplasma. Estas interacciones directas tienden a sincronizar fase, pero puede no ser suficiente para hacer una fuerte sincronía. De hecho, los comportamientos celulares macroscópicas menudo muestran variaciones oscilatorias fluctuantes en lugar de oscilaciones claras con una gran amplitud, y las variaciones oscilatorias fluctuantes de diferentes identidades químicas muestran conmutación frecuente entre en fase y relaciones fuera de fase, aunque todavía muestra cada uno de los componentes bioquímicos el comportamiento ligeramente oscilatorio. Esta consideración implica que el ruido  $\xi$  debe ser pequeño, por lo que los efectos de desincronización son relativamente débiles.

La existencia de la respuesta SPS significa que el organismo anticipa el próximo cambio ambiental periódico. Para realizar esta función, se necesita la capacidad de memorizar la periodicidad. Por otra parte, el organismo memoriza no sólo la periodicidad sino también la fase específica de un período. Siguiendo esta línea de razonamiento, podríamos concluir que el plasmodio *Physarum* puede realizar una versión primitiva de la función cerebral (es decir, la memoria y la anticipación). Cabe señalar que, en el caso de la respuesta SPSD, la estimulación sola no proporciona ninguna información acerca de la periodicidad. Esto significa que la periodicidad anterior no sólo debe ser almacenada sino también evocada por el desencadenador de estimulación. Una actividad de este tipo se conoce como recuerdo. No está claro, sin embargo, si el plasmodio en realidad tiene la capacidad de recordar, porque la respuesta SPSD se observó sólo en  $\tau = 60$  min.

---

<sup>407</sup> Advección es la variación de un escalar en un punto dado por efecto de un campo vectorial. Por ejemplo: el transporte de una sustancia contaminante por la corriente de un río; en meteorología, el proceso de transporte de una propiedad atmosférica, como el calor o la humedad, por efecto del viento; en oceanografía, el transporte de ciertas propiedades, como la salinidad, por las corrientes marinas.

No es común encontrar los cambios ambientales recurrentes con períodos de 0,5-1,5 h en la naturaleza. Por lo tanto, algunos podrían considerar la capacidad de aprender una periodicidad de este tipo de sentido. Sin embargo, la conclusión opuesta también se puede extraer, a saber, que el organismo es capaz de recordar los cambios periódicos que no ha experimentado antes. Esto indica que el organismo tiene una capacidad generalizada para el aprendizaje, independiente de los detalles de la periodicidad.

Discernir una periodicidad no es fácil, incluso para los seres humanos. Según los libros de historia, cuando los antiguos egipcios reconocieron la periodicidad regular de las inundaciones del río Nilo y logró anticipar la próxima inundación, este avance provocó la invención del calendario y era un símbolo de los albores de la civilización. Por tanto, es notable que un organismo unicelular pueda realizar una función de este tipo.

Aunque los resultados descritos en esta investigación se obtuvieron en el auténtico moho mucilaginoso, los organismos más primitivos, como las bacterias, pueden demostrar un comportamiento inteligente con un mecanismo simple en términos de la dinámica no lineal (Ben Jacob, Becker, Shapira y Levine 2004). La perspectiva de la dinámica no lineal podría por lo tanto ser la clave para revelar el secreto de cómo los sistemas biológicos a superar retos para su supervivencia.

### **Creando redes de mayor eficiencia que las vías ferroviarias**

En 2010, Toshiyuki Nakagaki volvió a ganar el Ig Nobel. Esta vez el mérito fue compartido con Atsushi Tero, Seiji Takagi, Tetsu Saigusa, Kentaro Ito, Kenji Yumiki, Ryo Kobayashi de Japón, y Dan Bebber, Marcos Fricker del Reino Unido, por el uso del mixomiceto *Physarum polycephalum* para determinar las rutas óptimas para las vías de ferrocarril. El desarrollo se publicó en la revista *Science* el 22 de enero del mismo año con el título de “*Reglas para el diseño biológico inspirado redes adaptivas*”.<sup>408</sup>

Las redes de transporte son muy abundantes en los sistemas sociales y biológicos. Rendimiento de la red robusta trata de un complejo equilibrio que implica costos, la eficiencia del transporte, y tolerancia a fallos. Redes biológicas se han perfeccionado por muchos ciclos de presión de selección evolutiva y es probable que obtener soluciones razonables a problemas de optimización combinatoria. Por otra parte, se desarrollan sin un control centralizado y puede representar una solución fácilmente escalable para el crecimiento de las redes en general. Se demuestra que el moho mucilaginoso *Physarum polycephalum* forma redes con una eficiencia comparable, con una alta tolerancia a fallos, y el costo a los de la infraestructura de redes del mundo real –en este caso, el sistema ferroviario de Tokio. Los mecanismos básicos necesarios para la formación de redes de adaptación pueden ser capturados en un modelo de inspiración biológica matemática que puede ser útil para guiar la construcción de la red en otros dominios.

---

<sup>408</sup> Tero, A., Takagi, S., Saigusa, T., Ito, K., Bebber, D. P., Fricker, M. D., Yumiki, K., Kobayashi, R., Nakagaki, T. (2010) *Rules for Biologically Inspired Adaptive Network Design*. *Science*, Vol. 327. no. 5964, January 22, 2010, pp. 439-42.

Algunos organismos crecen en forma de una red interconectada, como parte de su estrategia normal de forraje para descubrir y explotar nuevos recursos. Estos sistemas se adaptan continuamente a su medio ambiente y debe equilibrar el costo de producción de una red eficiente con las consecuencias de un fracaso, incluso limitado, en un mundo competitivo. A diferencia de los sistemas de infraestructura antropogénicas, estas redes biológicas han sido objeto de sucesivas rondas de selección evolutiva, y es probable que hayan llegado a un punto en el que estén adecuadamente los costos, la eficiencia y capacidad de recuperación equilibrada. Con la inspiración de la biología ha dado lugar a enfoques útiles para la resolución de problemas, tales como redes neuronales, algoritmos genéticos, y las rutinas de búsqueda eficientes desarrolladas a partir de algoritmos de optimización de colonias de hormigas. Nakagaki y colegas utilizaron el moho mucilaginoso *polycephalum Physarum* para desarrollar un modelo de inspiración biológica para el desarrollo de la red de adaptación.

El individuo plasmodio inicialmente explora con un margen de alimentación relativamente contiguo para maximizar el área de búsqueda. Sin embargo esto se resuelve en una red tubular que une las fuentes de alimentos descubiertos a través de conexiones directas, conexiones intermedias adicionales (puntos de Steiner)<sup>409</sup> que reducen la longitud total de la red de conexión, y la formación de enlaces cruzados ocasionales mejorando en general la eficiencia del transporte y la resistencia. El crecimiento del plasmodio está influenciado por las características del sustrato y puede ser limitado por barreras físicas o influenciados por el régimen de luz o, facilitando a la investigación experimental las normas que subyacen a la formación de la red. Así, por ejemplo, hemos visto como el *Physarum* puede encontrar el camino más corto a través de un laberinto o conecte diferentes matrices de las fuentes de alimentos de manera eficiente con la longitud mínima total (LT) distancia mínima promedio todavía más corta (MD) entre pares de las fuentes de alimentos (FSs), con un alto grado de tolerancia a fallos (FT) para la desconexión accidental. Capturando la esencia de este sistema en reglas simples podría ser útil para orientar el desarrollo de las redes descentralizadas en otros dominios.

Nakagaki conectó al *Physarum* en una plantilla de 36 fuentes de alimentación FSs que representan las ubicaciones geográficas de las ciudades en el área de Tokio, y se comparó el resultado con la red ferroviaria actual en Japón. Al plasmodio se le permitió crecer a partir de Tokio y en un principio lleno de gran parte del espacio de suelo disponible, pero luego se concentró en las FSs por el adelgazamiento de la red para dejar un subconjunto de los tubos más grandes de interconexión, (Fig. 48.).

---

<sup>409</sup> El árbol de Steiner, nombrado en honor al matemático suizo Jakob Steiner (1796 – 1863), es un problema de optimización combinatoria consistente en buscar la interconexión más corta para un conjunto de elementos dado. Los vértices introducidos para decrecer la longitud total de las conexiones son conocidos como *puntos de Steiner* (La mediana de tres vértices de un grafo de medianas). Ha sido demostrado que la conexión resultante es un árbol, llamado árbol de Steiner. Pueden existir varios árboles de Steiner para un conjunto dado de vértices iniciales. El árbol de Steiner tiene aplicaciones en el diseño de circuitos eléctricos y redes de telecomunicaciones. Fuente: Wikipedia®

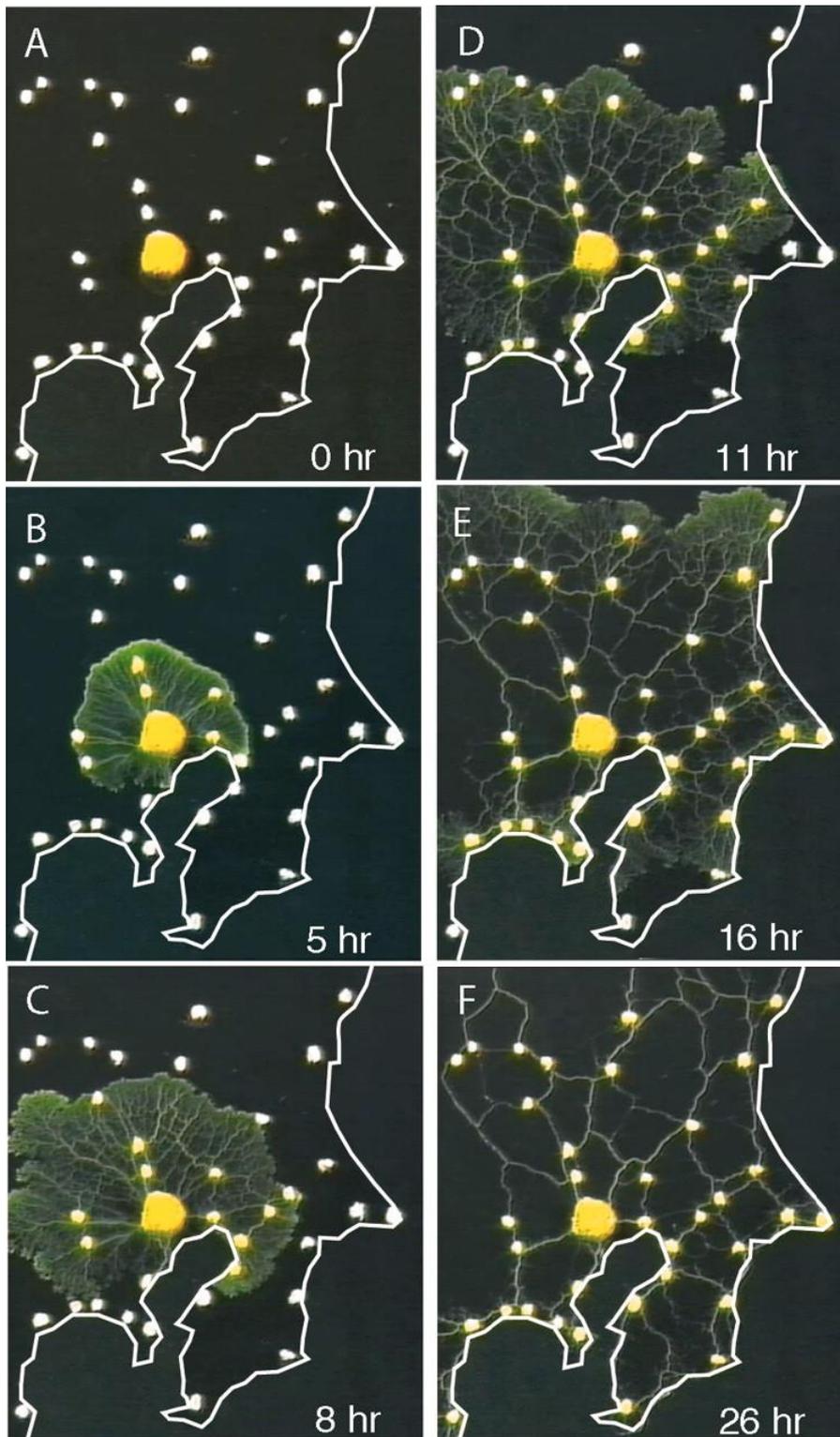


Fig. 48. Red en la formación de *Physarum polycephalum*. ( A ) En  $t = 0$ , un pequeño plasmodio de la *Physarum* se colocó en la posición de Tokio en un recinto experimental limitada por el litoral del Pacífico (borde blanco) y se completará con las fuentes de alimentos adicionales en cada una de las principales ciudades de la región (blanco puntos). La anchura horizontal de cada panel es de 17 cm.( B a F ) El plasmodio surgió de la fuente de alimentación inicial con un margen contiguos y progresivamente colonizado cada una de las fuentes de alimentos. Detrás del margen de crecimiento, el micelio propagación resolverse en una red de interconexión de los tubos de las fuentes de alimentos.

A continuación se presentó un protocolo alternativo, en el que el plasmodio se dejó extender completamente entre el espacio disponible y las fuentes de alimentación FSs, simultáneamente, dieron resultados similares. Para completar la formación de la red, que permite cualquier exceso de volumen de Plasmodio que se acumulan en una gran FS fuera de la arena (LFS, en la Fig. 48A).

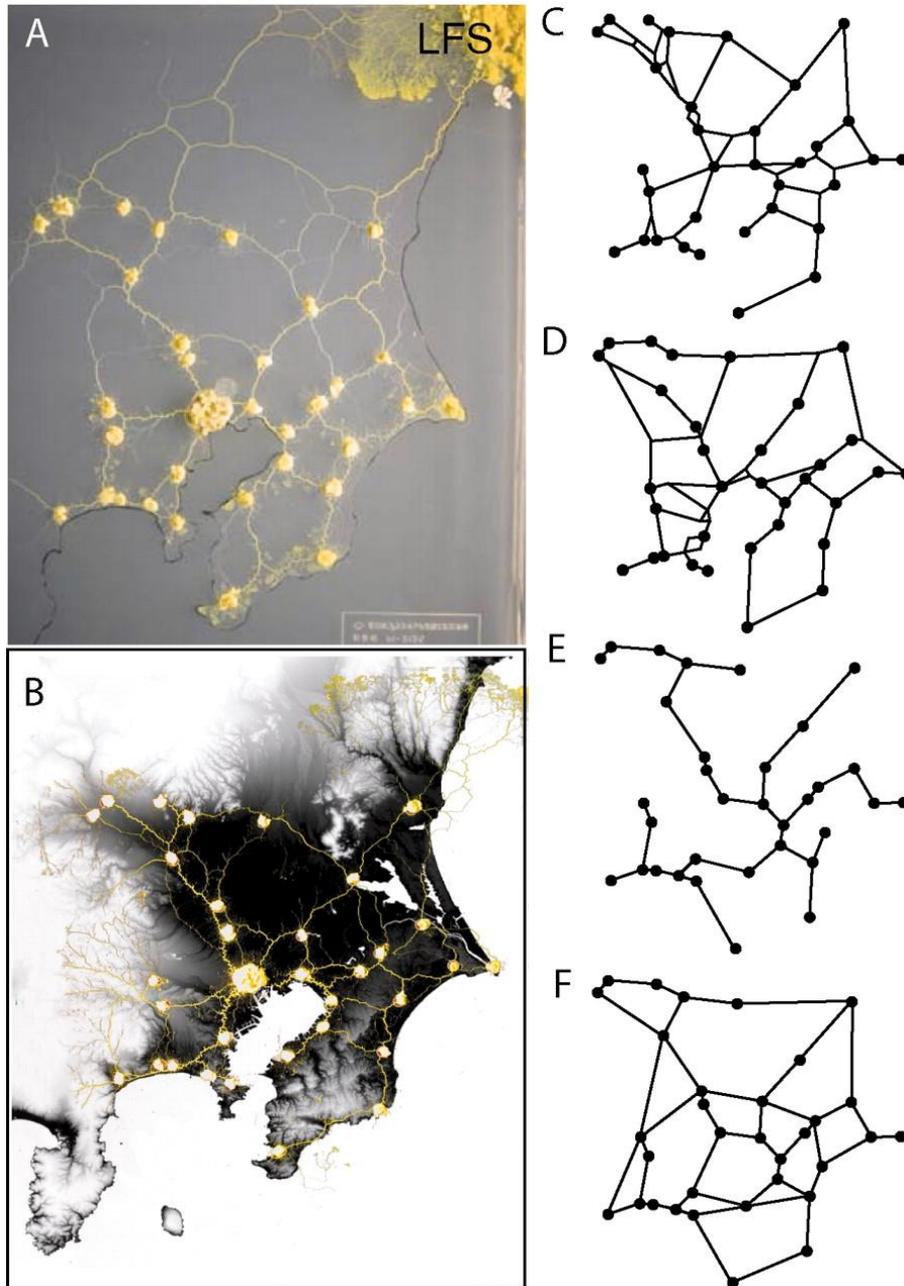


Fig. 49. La comparación de los Physarum redes con la red ferroviaria Tokio. (A) En ausencia de iluminación, el Physarum red como resultado de la exploración, incluso del espacio disponible. (B) las limitaciones geográficas se impusieron a los países en desarrollo Physarum red por medio de una máscara de la iluminación para restringir el crecimiento de las zonas más sombreadas que corresponden a regiones de baja altitud. El océano y los lagos interiores también se les dio una iluminación fuerte para prevenir el crecimiento. (C y D) La red resultante (C) se comparó con la red ferroviaria en el área de Tokio (D). (E y F) El árbol de expansión mínima (MST) que conecta el mismo conjunto de nodos de la ciudad (E) y una red modelo construido por la adición de enlaces adicionales con el MST (F).

Una gama de soluciones de la red eran evidentes al replicar los experimentos (compárese con la Fig. 49A. con la figura 49F.), sin embargo, la topología de muchas redes de Physarum llevaba similitud con la red ferroviaria real (Fig. 49D.). Algunas de las diferencias pueden estar relacionadas con las características geográficas que limitan la red ferroviaria, tales como terrenos montañosos o lagos.

Estas restricciones fueron impuestas en el Physarum la red mediante la variación de la intensidad de la iluminación, ya que el plasmodio evita la luz brillante. Esto produjo redes (Fig. 49, B y C) con una mayor congruencia visual a la red ferroviaria real (Fig. 49D). Las redes también se compararon con el árbol de expansión mínima (MST, fig. 49E), que es la red más breve posible conectar todas las posiciones de la ciudad, y diversos derivados con un número creciente de enlaces cruzados añadido (por ejemplo, la Fig. 49F), que culminó en una triangulación de Delaunay<sup>410</sup> completamente conectados, lo que representa la red conectada al máximo que une todas las ciudades.

El rendimiento de cada red se caracteriza por el coste (TL), la eficiencia del transporte (MD), y la solidez (FT), normalizada al valor correspondiente para el árbol de expansión mínima MST para dar  $TL_{MST}$ ,  $MD_{MST}$ , y el  $FT_{MST}$ . El TL de la red ferroviaria Tokio fue mayor que el MST por un factor de  $\sim 1,8$  (es decir,  $TL_{MST} \approx 1,8$ ), mientras que el promedio  $TL_{MST}$  para Physarum fue de  $1,75 \pm 0,30$  ( $n = 21$ ). Las redes iluminadas dieron un agrupamiento ligeramente mejor en torno al valor de la red ferroviaria.

Para la comparación, la triangulación de Delaunay fue más largo que el árbol de expansión mínima MST por un factor de  $\sim 4,6$ . Por lo tanto, el coste de las soluciones encontradas por el Physarum es muy similar al de la red ferroviaria, con aproximadamente el 30% del máximo número posible de enlaces en su lugar. El rendimiento del transporte de las dos redes también fue similar, con  $MD_{MST}$  de 0,85 y  $0,85 \pm 0,04$  para la red ferroviaria y las redes Physarum, respectivamente. Sin embargo, las redes Physarum lo han logrado con un coste marginal menor en general.

El modelo de inspiración biológica matemática ofrecido por Toshiyuki Nakagaki puede capturar la dinámica básica de la capacidad de adaptación de la red a través de la iteración de las normas locales y produce soluciones con propiedades comparables o mejores que las de las redes de infraestructuras del mundo real. Además, el modelo tiene una serie de parámetros ajustables que permiten el ajuste de la relación beneficio / coste para aumentar las características específicas, tales como la tolerancia a fallos, o la eficiencia del transporte, mientras mantiene los costes bajos.

Este modelo puede proporcionar un punto de partida útil para mejorar los protocolos de enrutamiento y el control de la topología de las redes auto-organizadas, tales como redes de sensores remotos, redes móviles ad hoc, o redes inalámbricas de malla

---

<sup>410</sup> Que veremos en detalle con los desarrollos de Andrew Adamatzky.

## **La toma de decisiones en el caso de los myxomicetos**

### **Decisiones e indecisiones del *Physarum polycephalum*.**

#### **¿Son auto-inducidas?**

Para poder hablar de “inteligencia” en procesos cognitivos mínimos registrados en los organismos sin sistema nervioso, tenemos que evaluar tanto empíricamente como epistemológicamente la actuación de dichos organismos en función de las condiciones categóricas que hemos descrito como normatividad cognitiva mínima. Nakagaki y colegas (2006)<sup>411</sup> muestran un problema dentro de esta normatividad cognitiva mínima que induce al replanteo de un comportamiento adaptativo selectivo y sus dificultades de actuación y, sobretudo, cuales son los modelos matemáticos que describen los patrones inductores de la toma de decisiones. Presentan un nuevo tipo de comportamiento que parece ser “*indeciso*” en el plasmodio *Physarum polycephalum*. Nakagaki comprueba que al migrar el plasmodio por un estrecho camino, este deja de moverse durante un período de tiempo – bastantes horas, aunque difieren de la duración cada plasmodio – cuando se encuentra con la presencia de un repelente químico como la quinina. Después de suspender el periodo con quinina, el organismo de repente empieza a moverse de nuevo, pero en una de estas tres maneras, según cómo aumente la concentración del repelente: pasando por el lugar repulsivo (penetración); dividiéndose en dos frentes: pensando pasar y haciendo giro (división); y dando marcha atrás (de rebote). En relación con el mecanismo fisiológico para la migración de la punta en el plasmodio, se encontró que el extremo frontal es capaz de moverse aún más a pesar de que la punta esté dividida en el cuerpo principal del organismo. Esto significa que se produce una fuerza motriz de la locomoción frontal por un proceso local en la punta. En base a este hallazgo, se considera un modelo matemático para la locomoción frontal con el fin de comprender la dinámica, tanto para el largo período de detención como para los tres tipos de comportamiento. Un modelo basado en ecuaciones de reacción-difusión logra reproducir la observación experimental, un modelo que hemos estudiado anteriormente en relación a otros principios mínimos para la cognición como son la discriminación sensorial y las tareas de memoria (Dale, Husbands 2010). El origen del largo tiempo de detención y las tres salidas diferentes se puede reducir a las inestabilidades ocultas de la dinámica interna del pulso, que puede ser una estructura de esqueleto extraída de una dinámica mucho más compleja incrustada en el plasmodio.

Aquí se define el comportamiento indeciso como: cuando un organismo se encuentra con una situación diferente o un problema, éste es incapaz de tomar una decisión clara en un curso de acción para un período de tiempo, y sólo puede actuar una vez que se tome una decisión.

---

<sup>411</sup> Takagi, S., Nishiura, Y., Nakagaki, T., Ueda, T., Ueda, K-I. (2006) *Indecisive Behavior of Amoeba crossing an Environmental Barrier*. In: Kousuke, Y. et al (Ed.) (2007) *Topological Aspects of Critical systems and Networks*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore.

Se obtuvieron pruebas claras de que el proceso de locomoción se localiza en el extremo frontal. En otras palabras, una punta que tiene la actividad de locomoción es capaz de estar al frente de locomoción. Además, se informó de que el patrón de polarizaciones químicas intracelulares corresponde a la polaridad de un plasmodio, por ejemplo, la concentración de ATP es mayor en la parte delantera y se vuelve menor la locomoción hacia la cola. De acuerdo con estos hechos, consideramos que la dinámica de los impulsos químicos polarizados sobre la base de una dimensión del sistema de reacción-difusión llamado modelo Gray-Scott, en el que se supone que el patrón químico con la forma semblante a un pulso corresponde a la actividad de la parte delantera de locomoción.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= D_u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - uv^2 + f(1 - u), \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= D_v \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + uv^2 - (f + k(x))v, \end{aligned} \quad x \in [0, L] \quad (1)$$

Donde  $u = u(t, x)$  y  $v = v(t, x)$  depende del tiempo  $t$  y la posición  $x$ ,  $f > 0$  and  $k > 0$  son parámetros cinéticos, y los coeficientes de difusión  $D_u > 0$ ,  $D_v > 0$  son constantes. En este modelo,  $u$  y  $v$  representan concentraciones de substrato y de producto respectivamente. Por lo tanto, en relación con el plasmodio, Nakagaki y sus colegas consideran que  $u$  y  $v$  corresponden a los nutrientes y las concentraciones de ATP intracelular respectivamente.  $k(x)$  es un parámetro de perturbación con distribución heterogénea de bombeo tipo:

$$k(x) = \begin{cases} k_0, & x \in [0, x_0) \cup (x_1, L], \\ k_0 + \epsilon, & x \in [x_0, x_1], \end{cases} \quad (2)$$

donde  $k_0, \epsilon \in \mathbb{R}$ . Observemos que  $\epsilon$  denota la altura del tope. Para el caso de un salto discontinuo, un análisis detallado ha sido realizado a través de dinámica de pulsos que viajan en medios heterogéneos del tipo de salto.

Para el caso de un solo salto discontinuo, se ha realizado un análisis detallado. Integramos las ecuaciones (1) utilizando el método de Crank-Nicolson<sup>412</sup> con  $D_u / D_v = 2$ ,  $L = 4.0$ ,  $x_1 - x_0 = 0,2$  y el intervalo de tiempo  $D_t = 0.05$  con condiciones de frontera de Neumann<sup>413</sup>. En este estudio hemos fijar el parámetro  $f = 0,024$ . La figura X muestra

<sup>412</sup> En el campo del análisis numérico, el método de Crank-Nicolson es un método de diferencias finitas usado para la resolución numérica de ecuaciones en derivadas parciales, tales como la ecuación del calor, o en teorías de bifurcación con pulsos como en nuestro caso. Se trata de un método de segundo orden en tiempo, implícito y numéricamente estable. El método fue desarrollado por John Crank y Phyllis Nicolson a mediados del siglo XX. Ver: Nishiura, Y. Oyama, Y. Ueda, K.-I. (2007) *Dynamics of traveling pulses in heterogeneous media of jump type*. Hokkaido Mathematical Journal Vol. 36, pp. 207–242

<sup>413</sup> la condición de frontera de Neumann (o de segundo tipo) es un tipo de condición de frontera o contorno, llamada así en alusión a Carl Neumann. Se presenta cuando a una ecuación diferencial ordinaria

que el pulso presenta tres respuestas diferentes cuando el pulso se encuentra con un tope en el centro después de parar en él durante un período de tiempo, es decir, el pulso muestra el comportamiento indeciso. Para un tope bajo, el pulso puede penetrarlo después de interrumpir el período. Para un tope alto, el pulso no puede penetrar en él y se vuelve después de dejar de período. Para un tope intermedio, el pulso se divide en dos, una de ellas penetra y el otro regresa. Por lo tanto, el pulso muestra cualitativamente el mismo comportamiento como el plasmidio. El diagrama de fase de la dinámica del pulso se muestra en la figura Y. El pulso muestra la penetración cuando es pequeño, y muestra de rebote cuando es grande. Cuando  $k_0$  es pequeño, hay una división entre la región de penetración y la región de rebote. Por lo tanto, hay tres comportamientos de la dinámica del pulso en los medios de comunicación heterogéneos de tipo choque, y el pulso cambia su comportamiento en función de los valores del parámetro de  $k_0$  y  $\mu$ . Aquí podemos dar una correspondencia entre los parámetros del modelo ( $k_0$  y  $\mu$ ) y las condiciones experimentales:  $k_0$  representa las condiciones ambientales, es decir, temperatura, humedad, concentración de agar, y así sucesivamente, y  $\mu$  representa la concentración de repelente a la mitad del camino, por ejemplo, la quinina concentración, mayor  $k_0$  y  $\mu$  valores se corresponden con peores condiciones. Hemos obtenido una buena correspondencia entre  $\mu$  y la concentración de la quinina para el pulso y para el comportamiento de plasmidio.

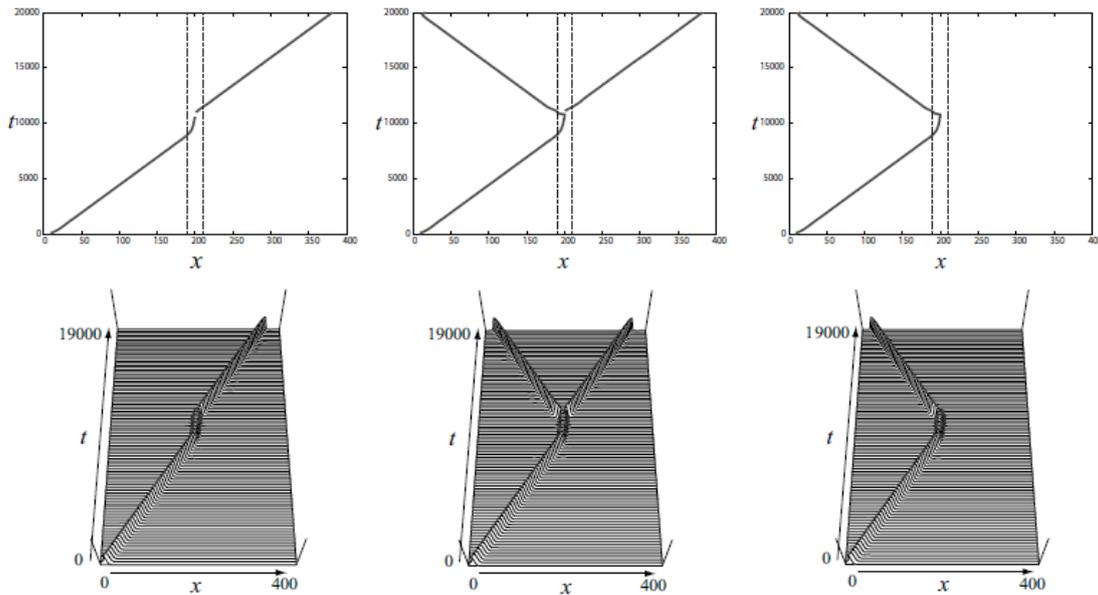


Fig.50. Dinámica de pulso del modelo de reacción – difusión de Gray-Scott (ecuaciones (1)) en medios heterogéneos, con diferentes alturas de tope. Panel superior muestra las huellas del tiempo de los frentes de onda, y el panel inferior muestra trazos de espacio-tiempo de pulsos dinámicos. Izquierda: Penetración ( $= 0,000216614$ ). Medio: División ( $= 0,000216618$ ). Derecha: Rebote ( $= 0,000216619$ ). En cada caso,  $k_0 = 0,05543$ . El tope ( $[x_0, x_1]$ ,  $x_0 = 1.9$ ,  $x_1 = 2.1$ ) se indica con líneas punteadas.

o en derivadas parciales, se le especifican los valores de la derivada de una solución tomada sobre la frontera o contorno del dominio.

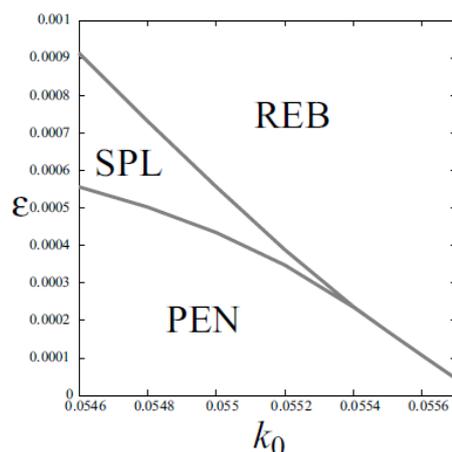


Fig. 51. Diagrama de fase de pulsos dinámicos en medios heterogéneos. PEN: penetración, SPL: dividir, REB: rebote. Triple unión es  $(k_0, \epsilon) \approx (0,0555, 0,0001705)$ . El lugar del tope es la misma que en la figura 50

Incluso en una ameba, se observan comportamientos indecisos similares. Aunque el comportamiento indeciso se piensa que es una función superior en el cerebro, también es posible a nivel celular. Capacidad de procesamiento de la información en una célula es mucho mayor de lo esperado, por lo que es necesaria una nueva evaluación. Aquí hablamos de un posible mecanismo de la conducta indecisa similar en términos dinámica de no lineales. Una idea clave en el modelo matemático propuesto aquí se caracteriza por un nuevo concepto recientemente sugerido de “*scattor*”<sup>414</sup> (Nishiura, Y. Teramoto, T y Ueda, K.-I. 2003): una estructura de silla de montar que atrae a trayectorias muy abiertos y los ordena a varias cuencas de diferente atractores. En pocas palabras, un “*scattor*” corresponde al estado indeciso y cada atractor diferente corresponde a un comportamiento de diferentes impulsos, aproximándose a una parte inestable de la variedad accionado por sí mismo, es decir autoinducido. Como los parámetros varían, cuanto más cerca del *scattor*, mayor será el tiempo para una trayectoria para permanecer en el estado indeciso. Pero la duración de tiempo en experimentos reales es bastante impredecible bajo una pequeña fluctuación. Sin embargo, la dinámica del *scattor* como comentábamos anteriormente podrían ser considerados como un modelo dinámico mínimo que puede reproducir los comportamientos observados en los plasmidios. En este sentido, este modelo puede captar una esencia matemática para el desarrollo de conductas indecisas y autoinductoras -como en el *Physarum polycephalum* pero en un nivel mayor de abstracción.

<sup>414</sup> El enfoque a los fenómenos de dispersión reside en encontrar un origen del mecanismo de clasificación en lugar de tratar de describir los detalles de la solución de la gran deformación. Resulta que tal origen se identifica como las direcciones estables e inestables de un tipo especial de soluciones inestables llamadas “*scattors*”, que vinculan entrada a la salida en colisión. Un trabajo muy relacionado señala la importancia de este tipo de sillas de montar es Ref. 20 que se analizaba la transición de la aniquilación a la preservación de chocar las ondas procedentes de un modelo simple de continuum de pendula sometido a un par constante y un amortiguamiento viscoso. Nishiura, Y. Teramoto, T, Ueda, K.-I. (2003) *Dynamic transitions through scattors in dissipative systems*. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, Vol. 13, N°3, pp. 962-972.

## Andrew Adamatzky. La robótica híbrida con mixomicetos. Capacitación cognitiva adaptativa



Andrew Adamatzky

Andrew I. Adamatzky es profesor en el Departamento de Ciencias de la Computación y director del Laboratorio de Computación No Convencional, de la Universidad de West England, Bristol, Reino Unido. Adamatzky hace investigación en computación de reacción-difusión, autómatas celulares, Physarum computado, computación paralela masiva, matemáticas, inteligencia colectiva y robótica, biónica, psicología computacional, ciencia no lineal, nuevos hardware, y computación aplicada emergente y futura.

Sus estudios sobre computación química a través de sistemas de reacción-difusión le llevo a experimentar con los Physarum polycephalum en estadio plasmodio, debido a que los flujos de corriente de expansión de las ramificaciones nerviosas del plasmodio fueron modelados matemáticamente a través de los modelos de Keller-Segel de reacción-difusión (1971). Los ordenadores de reacción-difusión, a pesar de ser máquinas computacionalmente universales son incapaces de construir ciertas clases de gráficos de proximidad sin la asistencia de un dispositivo informático externo. Adamatzky (2007, 2009a) demostró que el problema puede ser resuelto si el sistema de reacción-difusión está encerrado en una membrana con algunos “puntos de crecimiento”, lugares que guían el patrón de propagación. La aproximación arbórea experimental de los Physarum polycephalum demuestra la viabilidad de este enfoque. Utilizando el modelo de reacción-difusión del medio Belousov–Zhabotinsky,<sup>415</sup> Adamatzky (2009b) trata de generar una mimética del comportamiento de alimentación del Physarum polycephalum, sobre un sustrato pobre en nutrientes, por ejemplo, viendo que los patrones pueden seguirse computacionalmente.

A partir de estos experimentos exitosos Adamatzky estudió las características computacionales de los mixomicetos plasmodios que han permitido un gran avance en la robótica híbrida, al igual que estudios de matemática de grafos, puesto que los plasmodios están capacitados para generar un crecimiento arbóreo que siguen patrones matemáticos tan sorprendentes como la triangulación de Delaunay, o diagramas de Voronoi.<sup>416</sup>

---

<sup>415</sup> Que antes hemos visto tanto en rastreo la ruta más corta entre dos puntos seleccionados de un laberinto del plasmodio Physarum polycephalum, como también cuando se produce en el fenómeno atractor de AMPc de los mixomicetos pseudoplasmodios Dictyostelium discoideum.

<sup>416</sup> Shirakawa, T., Adamatzky, A., Gunji, Y.-P., Miyake, Y. (2009) *On Simultaneous Construction of Voronoi Diagram and Delaunay Triangulation by Physarum polycephalum*. International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol. 19, No. 9, pp. 3109–3117. Una triangulación de Delaunay es una red de triángulos que cumple la condición de Delaunay. Esta condición dice que la circunferencia circunscrita de cada triángulo de la red no debe contener ningún vértice de otro triángulo. La triangulación de Delaunay maximiza los ángulos interiores de los triángulos de la triangulación. Eso es muy práctico porque al usar

Un ejemplo de la triangulación de Delaunay con todos los circuncentros es el grafo dual del diagrama de Voronoi: los circuncentros son los vértices de los segmentos del diagrama.

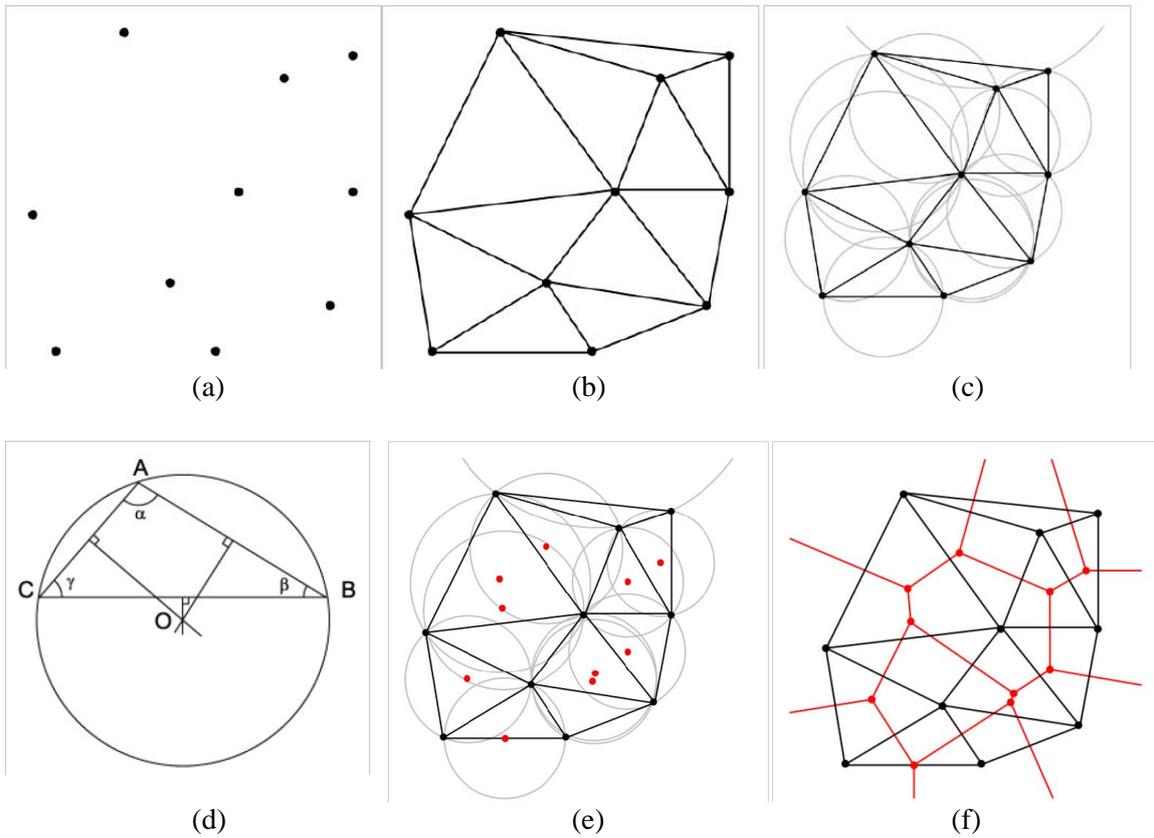
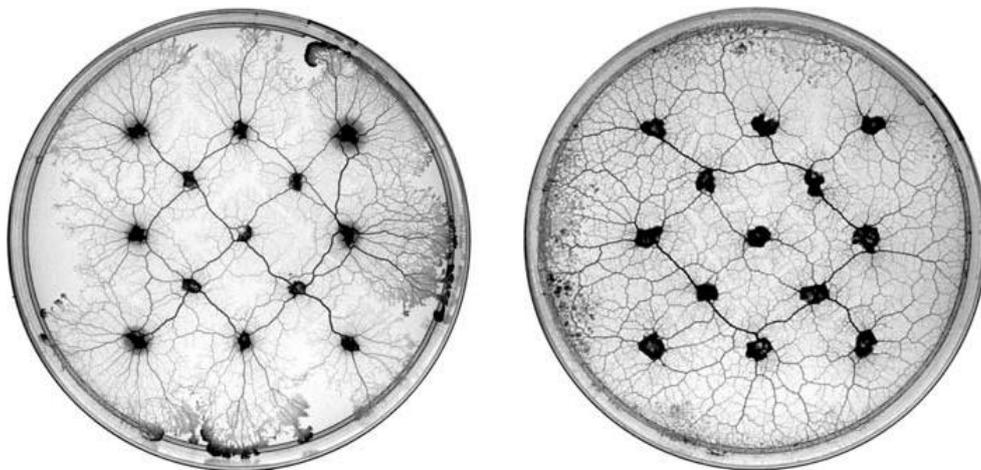


Fig 52 (a) De algunos puntos se quiere construir una triangulación. (b). Es fácil construir cualquiera triangulación simplemente conectando los vértices. (c) Con la condición de Delaunay se puede examinar si la triangulación es útil. (d). Los tres vértices A, B, C del triángulo ABC están a la misma distancia del circuncentro O. (e) La triangulación con todas las circunferencias circunscritas y sus centros (en rojo). (f). Conectando los centros de las circunferencias circunscritas se produce el diagrama de Voronoi (en rojo). Fuente Wikipedia ®



la triangulación como modelo tridimensional los errores de redondeo son mínimos. Por eso, en general se usan triangulaciones de Delaunay en aplicaciones gráficas en 3D.

Fig. 53(a)

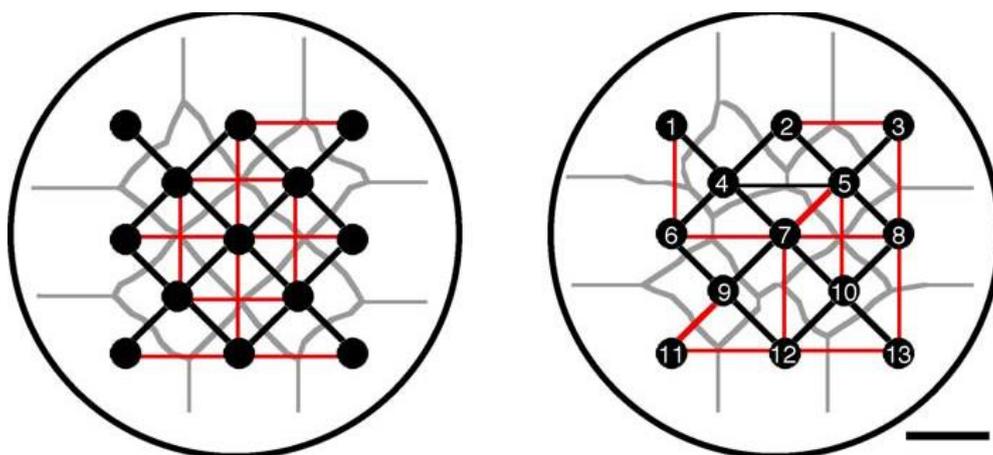


Fig. 53(b)

Fig. 53(a) La Triangulación de Delaunay (TD) representado por la red tubular del plasmodio. Fig. 53(b) Los bordes de la TD extrae a partir de Fig. X. (a). Los bordes del Diagrama de Voronoi se muestran con el color gris claro. Los bordes de TD representados por tubos protoplásmicos se muestran en negro, y los bordes de TD no representados se muestran en rojo. (Escala de barras: 2 cm): Fuente: (Shirakawa, Adamazky, Gunji, Miyake 2009)

El diagrama de Voronoi es una partición ampliamente utilizada del espacio que puede implementarse en una variedad de prototipos de computación no convencionales, compartiendo en común la propagación uniforme de la información a través de los frentes que emanan de fuentes puntuales de datos. El *Physarum polycephalum* construye minimizando las redes de transporte, pero también puede aproximarse al diagrama de Voronoi.

El *Physarum polycephalum* abarca fuentes de nutrientes y construye variedades de redes protoplásmicas durante su comportamiento de forrajeo. El plasmodio se coloca sobre un sustrato poblado con fuentes de nutrientes, que se extiende por las fuentes con la red protoplásmica. Entonces optimiza la red para entregar eficientemente los nutrientes a todas las partes de su cuerpo. ¿Cómo funciona exactamente el despliegue de la red protoplásmica durante comportamiento de forrajeo del plasmodio? ¿Qué tipos de gráficos de proximidad se aproximan por la red? El plasmodio construye un árbol de expansión mínimo primero y luego añade venas protoplásmicos adicionales para aumentar la fiabilidad y por medio de capacidad de la red. Adamatzky (2009c) estudió la posibilidad de que el plasmodio construya una serie de gráficos de proximidad: el gráfico-vecino más cercano (NNG)<sup>417</sup>, árbol de expansión mínimo (MST)<sup>418</sup>, grafo de

<sup>417</sup> El gráfico de vecino más cercano (NNG) para un conjunto  $n$  de objetos  $P$  en un espacio métrico (por ejemplo, para un conjunto de puntos en el plano con la distancia euclídea) es un grafo dirigido con  $P$  estando su conjunto de vértices y con una arista dirigida de  $p$  a  $q$  cada vez que  $q$  sea un vecino cercano de  $p$  (es decir, la distancia de  $p$  a  $q$  es no más grande que de  $p$  a cualquier otro objeto de  $P$ ). Fuente: Wikipedia®

<sup>418</sup> Dado un grafo conexo y no dirigido, un árbol recubridor mínimo de ese grafo es un subgrafo que tiene que ser un árbol y contener todos los vértices del grafo inicial. Cada arista tiene asignado un peso proporcional entre ellos, que es un número representativo de algún objeto, distancia, etc.; y se usa para

vecindad relativa (RNG), la triangulación de Delaunay (DT) y un gráfico de Gabriel (GG).<sup>419</sup> Los gráficos se pueden arreglar en la jerarquía de inclusión, llamada también jerarquía Toussaint:  $NNG \subseteq MST \subseteq RNG \subseteq GG \subseteq DT$ . Es decir, que el gráfico del vecino más cercano está incluido en el árbol de expansión mínimo, incluido también en el grafo de Gabriel, que se incluye en la triangulación de Delaunay. Adamatzky verificó que los gráficos, donde los nodos son fuentes de nutrientes y los bordes son tubos protoplasmáticos, aparece en desarrollo del plasmodio en el orden  $NNG \rightarrow MST \rightarrow RNG \rightarrow GG \rightarrow DT$ , que corresponde a la inclusión de los gráficos de proximidad en la jerarquía de Toussaint.<sup>420</sup>

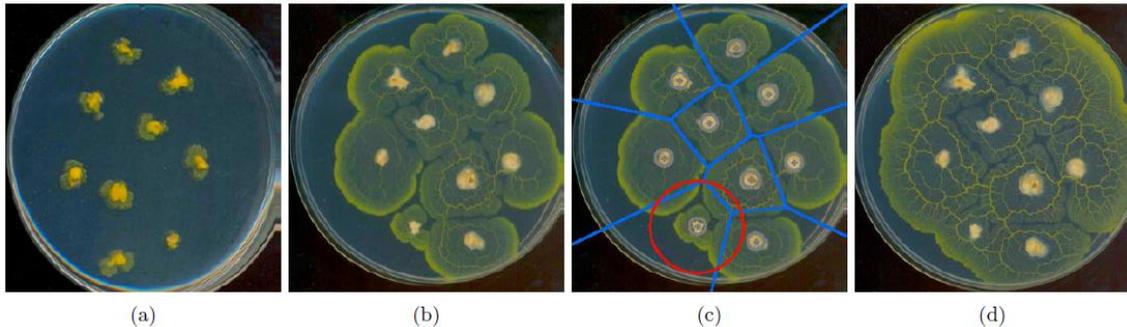


Fig. 54. Aproximación de diagrama de Voronoi por Physarum utilizando el método de los frentes que se fusionan: (a) los lugares de inoculación representan puntos de datos planar que se subdividen por bordes del diagrama de Voronoi, (b) la propagación de la creciente plasmodios a las 10h. Bisectrices de diagrama de Voronoi están representados por el lugar de sustrato no ocupado por plasmodio, (c) Plasmodio con el Diagrama de Voronoi superpuesto (azul) calculado por el método clásico, (d) Fusión de los frentes de crecimiento a las 16 h. Las imágenes de (Adamatzky 2010b; Jones, Adamatzky 2015)

### El Physarum polycephalum como Memristor

En 2009, un circuito electrónico sencillo que consiste de una red LC y un memristor fue utilizado para modelar experimentos sobre el comportamiento de la adaptación de organismos unicelulares (Pershin, La Fontaine y Di Ventra 2009). Se demostró que si se somete a un tren de impulsos periódicos, el circuito aprende y anticipa el siguiente pulso

---

asignar un peso total al árbol recubridor mínimo computando la suma de todos los pesos de las aristas del árbol en cuestión. Un árbol recubridor mínimo o un árbol expandido mínimo es un árbol recubridor que pesa menos o igual que otros árboles recubridores. Todo grafo tiene un bosque recubridor mínimo. Fuente Wikipedia®

<sup>419</sup>El gráfico Gabriel es un subgrafo de la triangulación de Delaunay; se puede encontrar en el tiempo lineal si se da la triangulación de Delaunay. Fuente: Wikipedia®

<sup>420</sup> En 1980 Godfried Toussaint, profesor de Ciencias de la Computación y el Jefe del Programa de Ciencias de la Computación en la Universidad de Nueva York Abu Dhabi (NYUAD) en Abu Dhabi, introdujo el grafo de vecindad relativa (RNG) a los campos de reconocimiento de patrones y aprendizaje automático, y mostró que contenía el árbol de expansión mínimo, y que era un subgrafo de la triangulación de Delaunay. Otros tres gráficos de proximidad muy conocidos son el gráfico más cercano vecino, el gráfico de Urquhart, y el gráfico de Gabriel. El primero está contenido en el árbol de expansión mínimo, y la gráfica Urquhart contiene el grafo de vecindad relativa (RNG), y éste está contenido en la triangulación de Delaunay. Dado que todos estos gráficos se anidan juntos se conocen como la jerarquía Toussaint. Ver: Toussaint G. (1980) *The relative neighbourhood graph of a finite planar set*. Pattern Recognition Vol. 12. pp. 261-8

similar al comportamiento de los plasmidios *Physarum polycephalum*, donde la viscosidad de los canales en el citoplasma responden a los cambios periódicos del entorno. (Saigusa, Tero, Nakagaki y Kuramoto 2008). Las aplicaciones de tales circuitos pueden incluir, por ejemplo, reconocimiento de patrones. El proyecto "SyNAPSE" de DARPA financió los laboratorios HP, en colaboración con los Laboratorios Neuromórficos de la Universidad de Boston, han estado desarrollando arquitecturas neuromórficas basados en sistemas memristivos.<sup>421</sup> Pero ¿Qué es un memristor?

El memristor (una contracción de las palabras “memoria” y “resistor”) fue un término acuñado en 1971 por el ingeniero eléctrico Leon Chua como el componente eléctrico pasivo de dos terminales no-lineales, ya que relaciona la vinculación de la carga eléctrica con un flujo magnético.<sup>422</sup>

El memristor es formalmente el 4º elemento de circuito fundamental desaparecido. Los otros son la resistencia, el condensador y el inductor. Se ha postulado que existe por Leon Chua basado en el hecho de que cuando se escribe cosas que uno puede medir en un circuito electrónico, todos ellos están unidos por una ecuación que define un dispositivo o una relación fundamental, excepto ésta. No había ningún dispositivo para vincular flujo magnético y carga eléctrica vinculada con el condensador, la resistencia y el inductor, pero Chua llenó este vacío de una forma teórica haciendo incapié en que a las leyes de la física parece que le gusta la simetría, que postuló el memristor. Llenando así este vacío.

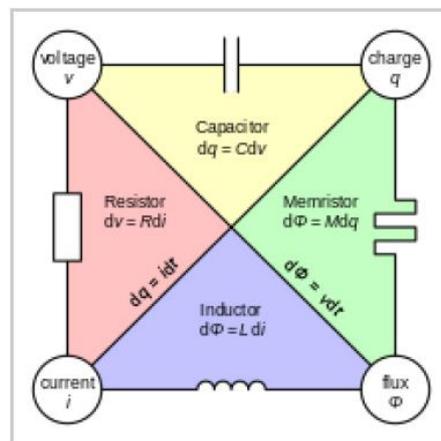


Fig. 55. Simetrías conceptuales de resistencia, condensador, inductor, y memristor. Fuente: Wikipedia®

<sup>421</sup> Para mayor información de la relación de circuitos memristor y redes neuronales ver: Versace, M., Chandler, B. (2010) *MoNETA: A Mind Made from Memristors*. IEEE Spectrum. Vol. 12, Nº 12, pp. 30–37. Snider, G. (2011) *From Synapses to Circuitry: Using Memristive Memory to Explore the Electronic Brain*. IEEE Computer Vol.44. Nº 2, pp. 21–28. Merrikh-Bayat, F., Bagheri-Shouraki, S. (2011) *Efficient neuro-fuzzy system and its Memristor Crossbar-based Hardware Implementation*. arXiv:1103.1156. Chua, L. (2013). *Memristor, Hodgkin-Huxley, and Edge of Chaos*. Nanotechnology Vol. 24. Nº 38, pp. 383001.

<sup>422</sup> Chua, L. O. (1971) *Memristor-The missing circuit element*. IEEE Transactions on Circuit Theory. Vol. 18, Nº. 5, pp. 507-519.

El uso de memristores en Redes Neuronales es una técnica de cálculo mediante el cual se intenta modelar las computadoras del cerebro como en un software. Ella Melissa Gale del departamento de química de la University of Bath, en Somerset, puso memristores entre neuronas para controlar los pesos de conexión.<sup>423</sup> A continuación, la red neuronal fue dada la muy simple tarea de aprender a navegar un robot alrededor de un laberinto. Evolución se realiza en la red neuronal para tratar y desarrollar un circuito de cerebro que podría encontrar la forma de hacer esta tarea. Lo más interesante fue que los pesos de conexión variaron durante la tarea, lo que demuestra que la red neuronal puede aprender directamente del medio ambiente, entre los cambios dirigidos evolutivamente.<sup>424</sup>

La operación de los dispositivos RRAM fue recientemente conectada al concepto de memristor.<sup>425</sup> De acuerdo con características relaciones matemáticas, hipotéticamente el memristor podría operar de la siguiente manera: *la resistencia eléctrica del memristor no es constante sino que depende de la historia de la corriente que ha fluido previamente a través del dispositivo; es decir, su resistencia actual depende de la cantidad de carga eléctrica que ha fluido, y en qué dirección, a través de él en el pasado. El dispositivo recuerda su historia, la llamada propiedad de no-volatilidad. Cuando el suministro de energía eléctrica es desconectado, el memristor recuerda su resistencia más reciente, hasta que vuelva a ser encendido.*

Leon Chua ha argumentado recientemente que la definición podría ser generalizada para cubrir una gran amplia gama de dispositivos de memoria de dos terminales no-volátiles, basados en los efectos de resistencia conmutativa (resistencia variable). Aunque algunas pruebas experimentales contradicen esta afirmación, ya que el efecto no-pasivo de una nanobatería es observable en la memoria de la resistencia conmutativa. Chua también argumentó que el memristor es el elemento conocido más antiguo de los circuitos, con sus efectos precediendo al resistor, capacitor y al inductor.

Los memristores, como resistencias, regulan el flujo de electricidad a través de un circuito, pero pueden “recordar” una carga particular, incluso cuando está apagado. Esto significa que podrían ser utilizados para crear la memoria del ordenador más eficiente. HP afirma haber construido un memristor mundo real y ha estado trabajando para comercializar la tecnología en los últimos años, aunque algunos científicos han afirmado que las invenciones de HP no son en realidad memristores. Otros, por su parte, han mirado a los sistemas biológicos para ejemplos de trabajo de memristores.<sup>426</sup>

---

<sup>423</sup> Gale, E., Iqbal, A., Davey, J., Gater, D. (2015) *Neural Net to Neuronal Network Memristor Interconnects*. DOI: 10.1007/978-3-319-16844-9\_8

<sup>424</sup> Gale, E. (2011) Biology and computing. En: UWE Health and LifeSciences Faculty Research Colloquium, University of the West of England, Bristol, UK, November 2011.

<sup>425</sup> Resistive random-access memory (RRAM or ReRAM) es un tipo de memoria de computadora no-volátil (NV) de acceso aleatorio (RAM) que funciona cambiando la resistencia a través de un material dieléctrico de estado sólido al que también se le refiere como memristor. Fuente Wikipedia®

<sup>426</sup> *Spore-Spitting Slime Molds Make Great Computer Hardware*. Por Klint Finley, 20.de junio 2013. Wired Magazine. <http://www.wired.com/2013/06/slime-mold-computers/>

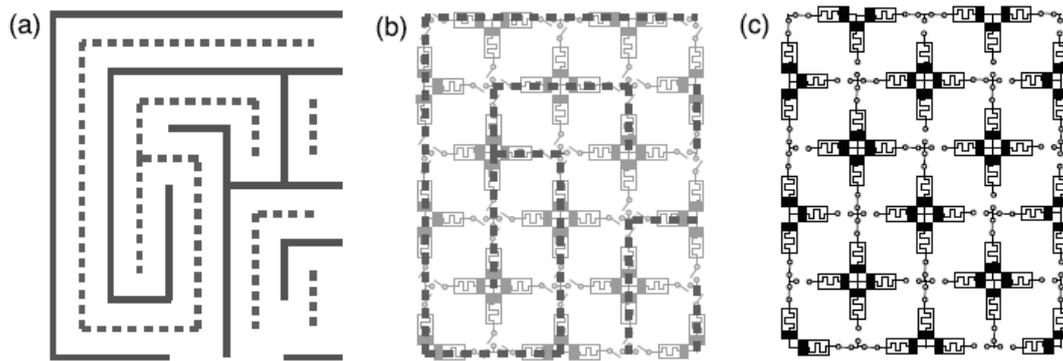


Fig. 56 (a) Una parte de un laberinto sencillo en 2 dimensiones con muros sólidos grises y rojos, rotos, posibles vías. (b) Una superposición del memristor / modelo del tablero de conmutación y las vías. (c) Los interruptores están para posibles vías y otras formas. Imagen redibujada de Pershin y Di Ventra (2011), Tomas y Kaltschmidt, en Adamatzky y Chua (eds) (2014)

Como hemos comentado al principio 2009, Pershin, La Fontaine y Di Ventra investigadores de la Universidad de California en San Diego y la Universidad de Carolina del Sur publicaron un artículo observando que la capacidad para adaptarse a los estímulos que tiene el *Physarum polycephalum* se debe a su capacidad de actuar como un memristor. Este fue un artículo teórico centrado en el aprendizaje sobre los orígenes de la inteligencia.

En 2011, Pershin y Di Ventra realizaron una prueba de un laberinto dada con memristores. El laberinto y otras posibles vías se muestran en la Fig. 56 (a). El laberinto se superpone a un patrón de cabeza a cabeza y de tablero de ajedrez-cola con cola de memristores en la Fig. 56 (b). Cada memristor está conectado a los otros a través de un interruptor en la zona trasera. Para codificar el patrón, el interruptor está cerrado por las posibles vías y cerrado por pasajes bloqueados. Esto conduce a una configuración de memristors como se ilustra en la Fig. 56 (c). Se prepara un laberinto completo de la misma manera, y se aplica un voltaje a través de los puntos de entrada y salida del laberinto para resolverlo. La solución se determina mediante una lectura de salida de cada una de las resistencias memristor (todos los interruptores se ponen en el estado apagado). La red encuentra el camino más corto, que viene dado por las resistencias más bajas, así como todas las otras soluciones. La resistencia para cada trayectoria es proporcional a su longitud. La red no tiene reloj externo y encuentra todas las soluciones en paralelo en un “paso”, aunque el adicional de lectura de salida requiere medidas de resistencia posteriores. Es un buen ejemplo de un sistema analógico de adaptación a gran escala. (Pershin y Di Ventra 2011; Adamatzky y Chua 2014).

En particular, se ha demostrado en un experimento reciente (Saigusa, Tero, Nakagaki y Kuramoto 2008) que el *Physarum polycephalum* sometidos a condiciones periódicas desfavorables ambientales (temperatura más baja y la humedad) no sólo responde a estas condiciones mediante la reducción de su velocidad de locomoción, sino también anticipa las futuras condiciones ambientales desfavorables reduciendo la velocidad en el momento en el que habría ocurrido el próximo episodio desfavorable.

Si bien el mecanismo microscópico de tal comportamiento no ha sido identificado por los autores de ese trabajo, sus medidas experimentales demuestran claramente la capacidad del *Physarum polycephalum* de anticipar un cambio ambiental inminente. Más específicamente, se midió la velocidad de locomoción del *polycephalum Physarum* cuando las condiciones ambientales favorables ( $26^{\circ}\text{C}$  y 90% de humedad) fueron interrumpidos por tres pulsos igualmente espaciados de 10 min de condiciones ambientales desfavorables ( $22^{\circ}\text{C}$  y 60% de humedad). La separación de tiempo entre los impulsos de  $\tau$  se seleccionó entre 30 y 90 minutos. Se observó que la velocidad de locomoción en condiciones favorables (aproximadamente  $0,25 \text{ mm} / 10 \text{ min}$ ) se vuelve a cerrar a cero cada vez que se presentaron las condiciones desfavorables. Sin embargo, se observaron ralentizaciones espontáneas en fase, después de intervalos de tiempo  $\tau$ ,  $2\tau$ ,  $3\tau$  e incluso después de la última aplicación de condiciones desfavorables. Además si – después de un largo período de condiciones favorables – a continuación se aplica de nuevo un único pulso de condiciones desfavorables, entonces una ralentización espontánea (llamado una ralentización espontánea en-fase después de una desaparición) después se observó un intervalo de tiempo  $\tau$ . De ello se desprende que el *Physarum polycephalum* tiene un mecanismo de memorizar (“aprender”) la periodicidad de los cambios ambientales y adapta su comportamiento a la espera de próximos cambios por venir.

Hemos desarrollado un modelo de circuito de la conducta adaptativa del mixomiceto que se ha dado cuenta tarde experimentalmente utilizando dióxido de vanadio como elemento de memoria. El circuito de aprendizaje se muestra en la Fig. 57 (a).

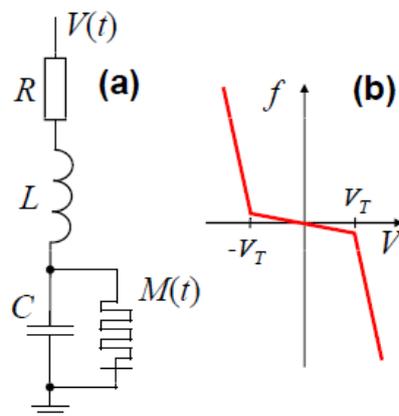


Fig. 57 (a) Una posible realización del circuito de aprendizaje que consiste en la resistencia  $R$ , inductor  $L$ , el condensador  $C$  y el sistema memristivo  $M$ . (b) Esquema de la función  $f(V)$  que define un sistema de memristivo de tipo umbral.

Aquí, el papel de las condiciones ambientales es interpretado por la tensión de entrada  $V(t)$  y la velocidad de locomoción está asignada en el voltaje a través del condensador  $C$ . El diseño del circuito de aprendizaje se asemeja a un contorno LC amortiguado en el que la cantidad de amortiguación se controla por el estado del sistema memristivo  $M$ . Para entender el funcionamiento del circuito, observamos que el sistema memristivo empleado en el circuito es de un tipo de umbral, es decir, su estado se puede cambiar

significativamente solamente por una tensión (a través del sistema de memristividad) con una magnitud superior a un umbral determinado. Fig. 57 (b) presenta la función de conmutación  $f(V)$  que se utiliza para describir un sistema memristive de tipo umbral.

Por otro lado, Ella Gale, Andrew Adamatzky and Ben de Lacy Costello, de la University of West England, han demostrado que estos organismos unicelulares como amebas podrían ser utilizados para construir las computadoras de ámbito general. Confirman que el plasmodio *Physarum polycephalum* puede actuar como memristor, un nuevo tipo de resistencia, un componente clave de los circuitos eléctricos (Gale, de Lacy Costello y Adamatzky 2014).

Ella Gale comenta que habiendo medido las propiedades físicas de la *Physarum* confirman que, midiendo experimentalmente la conductividad eléctrica del *Physarum* en vivo se llega a la conclusión de que se comporta como un memristor.

Resulta que, de hecho, el trabajo como memristores, da suficiente voltaje. Eso crea la posibilidad de utilizar los mixomicetos para construir nuevos tipos de ordenadores de uso general. Si el *Physarum* es un memristor entonces, de acuerdo con los conocimientos actuales, podemos hacer la lógica de implicación que puede formar un conjunto de puertas lógicas de Turing completo.

El modelo memresistible de aprendizaje de un mixomiceto, capaz de aprender a esperar un instante en una frecuencia determinada, ha sido modelado por un circuito que contiene sólo cuatro elementos del circuito de los cuales uno era un memristor.

El mayor obstáculo para la aplicación práctica en este momento es la vida del propio *Physarum. polycephalum*. Pero los ingenieros podrían no necesitar incorporar realidad viviente del *Physarum. polycephalum* para tomar ventaja de esta investigación. Parte de la idea de la investigación en curso es incluir nanopartículas metálicas y hacer que las computadoras de esa manera, que puedan implicar el *modus vivendi* del mixomiceto y establecer circuitos antes de aniquilar al plasmodio. Esto podría ser una manera más barata y más sostenible para hacer circuitos."

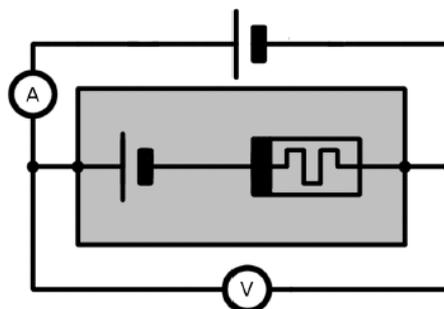


Fig.58. El circuito equivalente para el memristor *Physarum*, el área sombreada representa el memristor 2-puerto activo medio. Gale, de Lacy Costello y Adamatzky (2014)

Aplicaciones específicas dependerán de la solidez de los ordenadores según Adamatzky y Gale. Pero hay una posibilidad crear sensores ambientales. El mixomiceto es feliz con condiciones de humedad y son muy sensibles a la luz, por lo que podría ser utilizado como un sensor de luz en una red de túneles.

Ha sido en los últimos años una explosión de interés en el uso de materiales alternativos en la informática. Algunos son inorgánicos, como el uso del grafeno nanomateriales para crear transistores de átomos delgados. Pero el uso de los sistemas vivos es una de las zonas más fascinantes de la investigación. La Universidad de Leeds está tratando de utilizar bacterias para construir unidades de disco duro, e incluso hay posibilidad de utilizar los testículos de salmón en los dispositivos de almacenamiento. Adamatzky, de Laci Costello y Gale argumentan que este tipo de investigación nos ayuda a hacer algo más que crear nuevos tipos de ordenadores. También nos ayuda a entender la vida misma.

### **Actividad eléctrica del Physarum y la “alternativa-a poder ser-sistema nervioso”**

Como una célula excitable y memristiva que normalmente asume una ramificación o morfología estrelladas y/o fractal, el Physarum polycephalum es un organismo modelo único que comparte muchas de las propiedades fundamentales de las neuronas de mamíferos (Mayne, Tsompanas, Sirakoulis y Adamatzky 2014). Existen numerosos estudios que revelan las habilidades informáticas de plasmodio realizado por la formación de redes tubulares que conectan los puntos de interés. La investigación reciente que demuestra respuestas típicas en el comportamiento eléctrico del plasmodio a ciertos estímulos químicos y físicos ha generado interés en la creación de una interfaz entre el plasmodio y la lógica digital, con el objetivo de realizar tareas computacionales con el dispositivo resultante.

Adamatzky y colegas descubierto una compleja interacción de gama de comportamiento oscilatorio corto combinada con largo alcance, las oscilaciones de baja frecuencia que sirven para comunicar información entre las diferentes partes del plasmodio. La respuesta del plasmodio a las cambiantes condiciones ambientales forman los patrones básicos de la actividad eléctrica (Whiting, de Lacy Costello y Andrew Adamatzky 2013).

Del mismo modo, el Physarum es capaz de tener sintiencia háptica (detección táctil) (Adamatzky 2013b)<sup>427</sup>, química<sup>428</sup> y estimulación óptica (Adamatzky 2013c)<sup>429</sup> y

---

<sup>427</sup> El Physarum polycephalum responde a la aplicación y la eliminación de una presión mecánica local con impulsos eléctricos potenciales y los cambios en sus patrones de oscilación potenciales eléctricos. Los sensores táctiles basados en Physarum son ciertamente buenos en la detección de fuerzas dinámicas, y, posiblemente, podrían incluso detectar un deslizamiento de una carga, pero que no son buenos en la respuesta a las fuerzas estáticas. Esto genera muchas respuestas por resolver, como por ejemplo ¿Cuál sería una respuesta electrodinámica del Physarum de la fuerza aplicada en función del tiempo y su señal de detección en función del tiempo? ¿Cómo responderá el Physarum a una estimulación táctil en varios puntos al mismo tiempo? ¿Cuál es un rango dinámico de los sensores táctiles del Physarum? ¿Cómo funciona exactamente los sensores táctiles para que el Physarum pueda ser interconectado con sistemas

convertirlas a patrones característicos de sus oscilaciones potenciales eléctricos<sup>430</sup>. Las respuestas a los estímulos eléctricos pueden propagarse a lo largo de los tubos protoplásmicos para distancias superiores a decenas de centímetros, como hacen los impulsos en las vías nerviosas. El mixomiceto toma decisiones sobre su dirección de propagación basándose en la fusión de información de miles de *loci* protoplásmicos espacialmente extendidos, de manera similar a una neurona al recopilar información de su árbol dendrítico. La analogía, por ello es distante pero del todo inspiradora. Adamatzky especula sobre si las “alternativas–a poder ser–sistemas nervioso” (alternative-would-be-nervous systems) se pueden desarrollar y aplicar en la práctica sobre el *Physarum polycephalum*. Adamatzky (2015) descubre analogías entre el mixomiceto y las neuronas, y demostramos que el plasmodio puede desempeñar las funciones de los mecanorreceptores primitivos, fotorreceptores y quimiorreceptores; también muestra cómo los *Physarum* desarrollan las vías nerviosas. Los resultados constituyen el primer paso hacia los estudios de laboratorio de experimentación de la implementación del sistema nervioso en los mixomicetos.<sup>431</sup>

### Tanya Latty: Los Juegos del Hambre y la Memoria Espacial



Tanya Latty

Tanya Latty es una entomóloga con un interés especial en el comportamiento de los insectos y especialmente de los mixomicetos. Licenciada en Biología y Ciencias Ambientales de la Universidad de Trent (Canadá), y un doctora en ecología de los insectos de la Universidad de Calgary (Canadá), actualmente trabaja como profesora de Entomología del Departamento de Ciencias Vegetales y la Alimentación de la Universidad de Sidney. Su trabajo altamente interdisciplinario implica colaboraciones locales e internacionales con los investigadores en una amplia gama de campos, incluyendo las matemáticas, la informática, la silvicultura y la investigación de operaciones. Especialmente con los mixomicetos, trabaja con Madeleine Beekman y Chis Reid, ambos del Centro de Biología Matemática de la Universidad de Sidney, Toshiyuki Nakagaki de RIKEN de la Universidad de Hokkaido, y Audrey Dussutour del Centre de Recherches sur la Cognition Animale, del CNRS de Universidad de Toulouse III

---

robóticos existentes e integrarse con ellos? Adamatzky, A. (2013b) *Slime mould tactile sensor*. Sensors and Actuators B: Chemical Vol. 188, pp. 38–44

<sup>428</sup> Whiting, J., de Lacy Costello, B. P., Adamatzky, A. (2014) *Towards slime mould chemical sensor: Mapping chemical inputs onto electrical potential dynamics of Physarum polycephalum*. Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 191. pp. 844-853.

<sup>429</sup> En cuanto a la diversidad de las oscilaciones, *Physarum* reconoce cuando los colores blanco y verde se encienden. Adamatzky, A. (2013c) *Towards slime mould colour sensor: Recognition of colours by Physarum polycephalum*. Organic Electronics Vol. 14. N° 12, pp. 3355-3361.

<sup>430</sup> Adamatzky, A. (2014) *Slime mould electronic oscillators*. Microelectronic Engineering Vol. 124, pp. 58-65.

<sup>431</sup> Adamatzky, A. (2015) *A Would-Be Nervous System Made from a Slime Mold*. Artificial Life. Winter 2015, Vol. 21, No. 1, pp. 73-91.

El trabajo inicial que Tanya Latty estuvo haciendo con los mixomicetos fue el de comprender el modo en que afecta la calidad de los alimentos a la hora de tomar decisiones, en donde se reconoce que la calidad de los alimentos es directamente proporcional a la rapidez de adquisición e inversamente proporcional al tiempo empleado a la toma de decisiones (Latty y Beekman 2009). Se examinó también el desempeño de forrajeo en los paisajes con estructuras de conexión diferentes. Plasmodios en paisajes con correlación (la mitad de los parches sólo contiene alimentos de alta calidad, la mitad sólo contenía comida de baja calidad) ganaron más peso que los plasmodios se alimentan en paisajes no correlativos (parches en donde los dos discos contiene alimentos de alta y de baja calidad). Nuestros resultados muestran que la calidad de los alimentos afecta a la explotación y el comportamiento de búsqueda y que ambas conductas influyen en el rendimiento de forrajeo en diferentes paisajes.

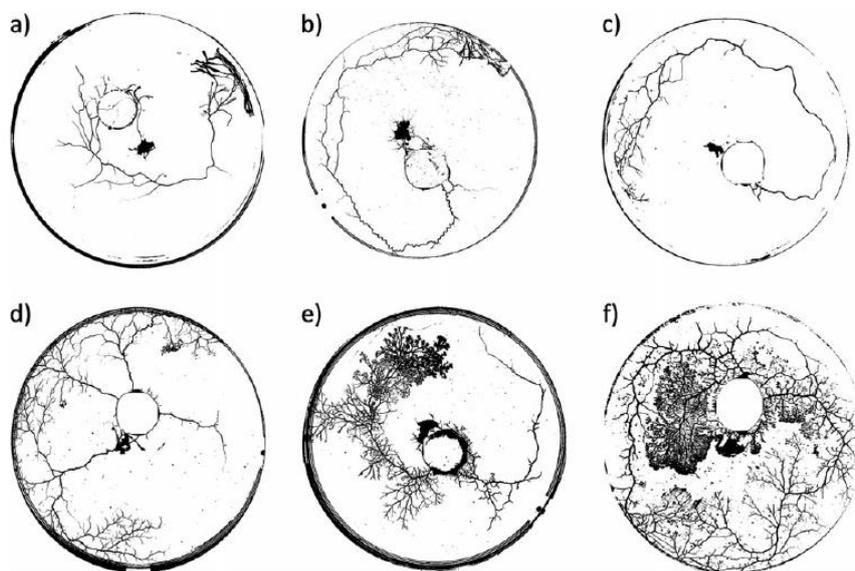


Figura 59. El efecto de la calidad de los alimentos en la morfología plasmodial después de 24 h. (a-f) Se muestran la morfología típica de plasmodios que se alimentaba de un 0%, 1%, 3%, 5%, 7%, y 10% respectivamente, de los discos de alimentos con copos de avena. Latty y Beekman (2009)

También se ha utilizado factores estresantes, como la luz y la gana para la toma de decisiones entre dos parches de alimentos sombreadas (uno de alta calidad, una baja calidad) (Latty y Beekman 2010). Examinamos elección parche en un entorno "sin riesgo" presentando al ameboide *Physarum polycephalum* hambriento y no-muerto de hambre con una elección entre dos parches de alimentos sombreadas. ). A continuación examinó elección parche en presencia de un conflicto entre el riesgo de forrajeo (exposición a la luz) y la calidad de los alimentos mediante la presentación de las amebas con una elección entre un parche de baja calidad a la sombra, y un parche de alta calidad de expuesto a la luz. Cuando se sombrea ambos parches, el 100% de las amebas selecciona el parche alimentos de calidad superior, con independendencia de las diferencias de calidad de alimentos o el estado energético del individuo. Cuando exposición a la luz y la calidad de los alimentos entran en conflicto, las amebas seleccionan el parche con la más alta calidad de los alimentos cuando la diferencia de

calidad entre los parches es alta. Pero cuando la diferencia de calidad entre los parches era pequeña, amebas seleccionan el parche de sombra, de menor calidad. Al final han demostrado cómo este comportamiento afecta al éxito de forrajeo de los organismos en diferentes paisajes. Es por lo tanto, un interesante ejemplo de la flexibilidad de comportamiento en un organismo unicelular.

Una cuestión fundamental en la biología nutricional es cómo los sistemas distribuidos mantienen un suministro óptimo de múltiples nutrientes esenciales para la vida y la reproducción. En el caso de los animales, las necesidades nutricionales de las células dentro del cuerpo son coordinadas por el cerebro en el diálogo neural y química con los sistemas sensoriales y los órganos periféricos. En el ámbito de una sociedad de insectos, los requisitos para toda la colonia se cumplen por los esfuerzos de alimentación de una minoría de trabajadores que responden a las señales que emanan de la cría. Ambos ejemplos implican componentes especializados para hacer frente a la oferta de nutrientes y la demanda (el cerebro y los órganos periféricos, recolectores y cría). Sin embargo, algunos de los más ricos en especies, más grande, y organismos heterótrofos ecológicamente significativos en la tierra, como las vastas redes de micelio de hongos, comprenden redes distribuidas sin centros especializados: ¿Cómo se coordinan estos organismos la búsqueda de múltiples nutrientes? Latty y colegas abordan esta cuestión a través del plasmodio *Physarum polycephalum* y demuestran que este organismo extraordinario puede tomar decisiones nutricionales complejas, a pesar de carecer de un centro de coordinación y que comprende sólo una única gran células multinucleadas. Se demuestra que un único moho mucilaginoso es capaz de crecer en contacto con parches de diferente calidad de los nutrientes en las proporciones precisas, necesarias para componer una dieta óptima. El *Physarum polycephalum* tienen la capacidad de mantener el equilibrio de nutrientes basados en carbono y nitrógeno, por forrajeo selectivo, tiene implicaciones considerables no sólo para nuestra comprensión del equilibrio de nutrientes en sistemas distribuidos, sino también para la ecología funcional de los suelos, el ciclo de nutrientes, y el secuestro de carbono (Dussutour, Latty, Beekman y Simpson 2011).

El plasmodio respondió a la concentración y el equilibrio de macronutrientes en su entorno y fue capaz de alterar su forma de crecimiento y movimiento a explotar los recursos de alimentos complementarios, y regular el suministro de hidratos de carbono y proteínas para una relación de destino que maximiza el rendimiento.

Como no se conoce si las señales nutricionales están integradas dentro de la matriz celular de un plasmodio, aunque parece muy probable que se distribuya totalmente, con la participación de mecanismos locales de detección de nutrientes, el movimiento, y las respuestas de crecimiento. El crecimiento de los mohos mucilaginosos implica dos procesos diferentes: la ampliación de la zona de red disponible para recoger los nutrientes y el aumento de la masa. Estos procesos son comparables a lo que se ha llamado el crecimiento de exploración y de explotación, respectivamente, en las colonias de hongos

## Las velocidades precisas y la toma de decisiones irracionales

La mayoría de los modelos de búsqueda de alimento animal y la elección de los consumidores asumen que los individuos toman decisiones basadas en el valor absoluto de los elementos y por lo tanto “económicamente racional”. Sin embargo, las frecuentes violaciones de la racionalidad por los animales, incluidos los humanos, sugieren que los animales utilizan normas de valoración comparativa. ¿Son las estrategias de valoración comparativa la consecuencia del procesamiento de información de los cerebros, o son una característica intrínseca de la toma de decisiones biológica? Latty y Beekman (2011), examinaron los principios de racionalidad en un organismo sin cerebro, como el *Physarum polycephalum* con unos mecanismos de procesamiento de información radicalmente diferentes. Ofrecieron una elección entre opciones de alimentos que variaban en calidad de los alimentos y la exposición a la luz (ya sabemos que el plasmodio es fotofóbico). El uso de una regla de valoración absoluta dará lugar a dos propiedades: la transitividad y la independencia de alternativas irrelevantes (IIA). La transitividad se satisface si las preferencias tienen una ordenación lineal constante, mientras que IIA afirma que la preferencia de un tomador de decisiones para un asunto no debe cambiar si el conjunto de elección se expande. Una violación de cualquiera de estos principios sugiere el uso de la comparativa en lugar de las normas de valoración absolutas. *Physarum polycephalum* satisface la transitividad por tener el ranking de preferencias lineales. Sin embargo, la preferencia del plasmodio para una alternativa focal aumentó cuando se añadió una tercera, la opción de una calidad inferior al conjunto de elecciones, violando así IIA y sugiere el uso de un proceso de valoración comparativo. El descubrimiento de las normas de valoración comparativas en un organismo unicelular sugiere que las normas de valoración comparativa son ubicuos, si no universales, entre los que toman las decisiones biológicos.

La valoración absoluta debe causar preferencias que sean consistentes a través de los contextos, es un concepto encapsulado en dos principios fundamentales: la transitividad y la independencia de alternativas irrelevantes (IIA). La transitividad estocástica débil requiere que las preferencias tengan un orden consistente, coherente internamente. Por ejemplo, si la opción A se prefiere más que a la opción B, y la opción B se prefiere más que a la opción C, a continuación, transitividad débil implica que la opción A debe de preferirse más que a la opción C. La transitividad estocástica fuerte requiere la fuerza de preferencias para ser consistente de tal manera que la fuerza de preferencia entre opciones en los extremos de la escala de preferencia (A versus C en el ejemplo anterior) será igual o más fuerte que entre los elementos adyacentes en el orden de preferencia (A frente a B o B contra C). Las violaciones de transitividad son incompatibles con la valoración absoluta y sugieren el uso de las normas de valoración comparativa.

La independencia de las alternativas irrelevantes sostiene que la preferencia de un tomador de decisiones para una opción en particular no debe cambiar cuando se añade una nueva opción de menor valor para el conjunto de elección. Una versión de IIA, llamada “regla de relación constante”, indica que la proporción relativa de elecciones realizadas entre dos opciones debe ser la misma independientemente de si se presentan

por sí solos o en presencia de una tercera opción, menos preferida. La relación de las violaciones de la regla constante puede ocurrir por dos razones: o bien porque el organismo utiliza un comparativo, en lugar de mecanismos de valoración absolutos, o porque el organismo viola el axioma de Luce, que establece que la probabilidad de seleccionar una opción es proporcional a la relación entre el valor de esa opción y la suma de los valores de las otras opciones disponibles.<sup>432</sup> Por ejemplo, el efecto de dilución al azar es un mecanismo de elección racional que puede, sin embargo, dar lugar a un ratio de violaciones de la regla constante.<sup>433</sup> Un individuo podría utilizar una regla de decisión tal que primero asigna una proporción fija de sus opciones para una opción preferida, y luego asigna aleatoriamente la preferencia que queda entre las opciones no preferidas. El efecto de dilución al azar se produce debido a la adición de un nuevo elemento a la conjunto de elección diluye el efecto de las opciones al azar, resultando en un cambio en la preferencia relativa para el elemento focal. Aunque violación de la regla constante relación es sugestivo de mecanismos de valoración comparativa, no se descarta la posibilidad de efectos tales como el efecto de dilución al azar. Una versión más fuerte de IIA, conocido como el principio de la “regularidad” proporciona evidencia más fuerte de los mecanismos de valoración absolutos. La regularidad es violada si la adición de una nueva alternativa a un conjunto de elección provoca un aumento en la preferencia absoluta para una de las opciones originales. Las violaciones de regularidad sólo pueden ocurrir si un organismo utiliza un mecanismo de valoración comparativa.

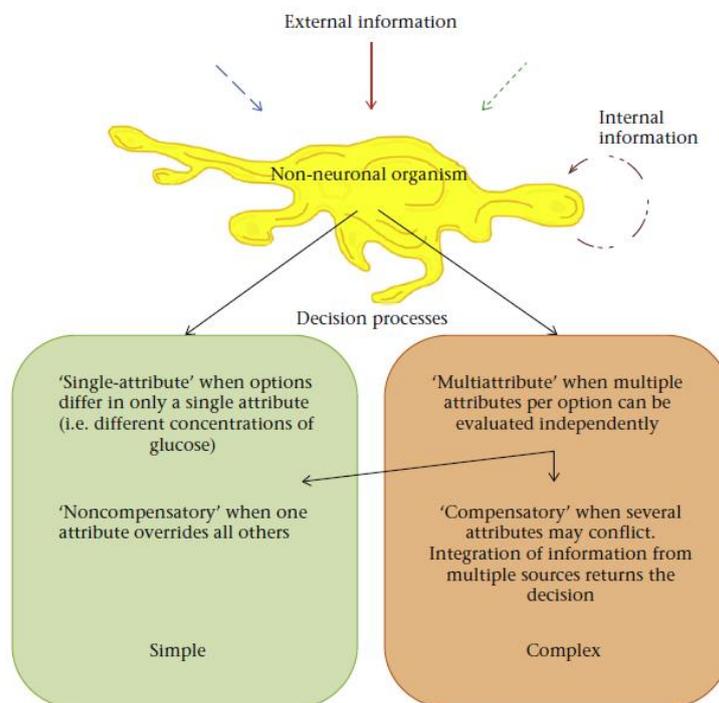


Fig. 60. Esquema simplificado para la categorización de la toma de decisiones en los organismos. Reid, Garnier, Beekman, Latty (2014)

<sup>432</sup> Luce R. D. (1959) *Individual choice behavior: a theoretical analysis*. New York, NY: Wiley

<sup>433</sup> Bateson M. 2004. *Mechanisms of decision-making and the interpretation of choice tests*. *Anim. Welfare* Vol. 13, pp. 115–120

El ranking de preferencias que plasmodios hicieron muestran compensaciones entre la exposición a la luz y la calidad de los alimentos. Esto es coherente con trabajos anteriores que muestran que el *Physarum polycephalum* puede hacer compensaciones entre el peligro y la calidad de los alimentos (Latty y Beekman 2010). La capacidad del plasmodio de hacer concesiones sugiere que su estrategia de toma de decisiones es compensatorio tal que los valores pobres de uno de los atributos de una opción (por ejemplo, exposición a la luz) puede ser compensada por los altos valores en otro atributo (la concentración de harina de avena). Los procesos de toma de decisiones compensatorias que el organismo requiere para clasificar cada atributo son computacionalmente más caros que las estrategias no compensatorias. Sin embargo, a pesar de carecer de un cerebro, el *Physarum polycephalum* es capaz de tomar decisiones consistentes y transitivas hora de elegir entre las fuentes de alimentos que varían en varios atributos.

	3D	5L	5D	10L	10D
3L	<b>3D (100%)</b> <i>p</i> < 0.0001	<b>5L (80%)</b> <i>p</i> = 0.016	<b>5D (100%)</b> <i>p</i> < 0.0001	<b>10L(100%)</b> <i>p</i> < 0.0001	<b>10D (100%)</b> <i>p</i> < 0.0001
	3D (100%) <i>p</i> < 0.0001	5L (57%) <i>p</i> = 0.52*	5D (100%) <i>p</i> < 0.0001	10L (100%) <i>p</i> < 0.0001	10D (100%) <i>p</i> < 0.0001
3D		<b>3D (78%)</b> <i>p</i> = 0.027	<b>5D (92%)</b> <i>p</i> = 0.0009***	<b>10L (100%)</b> <i>p</i> < 0.0001	<b>10D (100%)</b> <i>p</i> < 0.0001
		3D (77%) <i>p</i> = 0.046**	5D (80%) <i>p</i> = 0.016	10L (80%) <i>p</i> = 0.016	10D (94%) <i>p</i> = 0.0001
5L			<b>5D (100%)</b> <i>p</i> < 0.0001****	<b>10L (86%)</b> <i>p</i> = 0.0027	<b>10D (100%)</b> <i>p</i> < 0.0002****
			5D (100%) <i>p</i> < 0.0001	10L (100%) <i>p</i> < 0.001	10D (100%) <i>p</i> < 0.001
5D				<b>5D (93%)</b> <i>p</i> = 0.0002	<b>10D (100%)</b> <i>p</i> < 0.0001;
				10L (100%) <i>p</i> < 0.0001***	10D (86%) <i>p</i> = 0.0027
10L					<b>10D (86%)</b> <i>p</i> = 0.0027
					10D (100%) <i>p</i> < 0.0001
10D					

Tabla 1. Resultados de los ensayos de elección binomiales en plasmodios no-muertos de hambre y hambrientos. (Los valores en negrita son para plasmodios no muertos de hambre; valores en texto plano son para plasmodios hambrientos. La opción de comida en cada celda es la ganadora de la competencia binaria (significativamente superior al 50%). El número entre paréntesis indica el porcentaje de plasmodios que selecciona la opción ganadora (decisiones divididas excluidas, los que murieron, y los que no tomaron ninguna de las opciones seleccionadas). El número debajo es el *p*-valor para la prueba binomial. *n* = 15 (a no ser marcados con un asterisco). \* 2 plasmodios ha seleccionado ambos y fueron omitidos. *n* = 13, \*\* 1 plasmodio selecciona ambas y se omitió, 1 murió. *n* = 13, \*\*\* 2 plasmodios seleccionan ambos, y se omitieron. *n* = 13, \*\*\*\* 1 plasmodios seleccionan ambos y se omitieron. *n* = 14.) Latty y Beekman (2011a)

Los resultados muestran además que el plasmodio utiliza la información sobre su estado interno al tomar decisiones. Plasmodios hambrientos estaban más dispuestos a aceptar

la exposición a la luz con el fin de obtener una revisión de alimentos especialmente nutritivos (10L), mientras que los plasmodios no-muertos de hambre prefieren la calidad más baja, pero 'más seguro' alternativa (5D). Esta tendencia a forraje en un parche peligroso cuando hambre también se produce en los animales, donde es más probable que el forraje en ambientes con alto riesgo de depredación individuos muertos de hambre, mientras que los individuos no-muertos de hambre tienden a preferir hábitats más seguros. Sorprendentemente, plasmodios hambre no tenía una preferencia significativa por cualquiera 3L o 5L a pesar de que el consumo de 5L produce el doble de crecimiento como se alimentan de 3L (ver tabla 1). Plasmodios hambrientos eran también más propensos a hacer una decisión dividida mediante la asignación de biomasa a dos discos de alimentos. La indiferencia del plasmodios hambre parece indicar ya sea disminución de la selectividad o una reducción inducida por el hambre-en la capacidad para distinguir entre fuentes de alimentos similares.

Debido a la naturaleza viscosa del plasmodio, no fue posible probar la transitividad y IIA en individuos, y en su lugar, que se basó en las preferencias a nivel de población. Esto puede causar problemas, ya que, bajo ciertas condiciones, puede surgir la intransitividad de las preferencias de grupo incluso si las preferencias individuales son transitivas, resultando en una “paradoja de Condorcet”<sup>434</sup>. Esto sucede porque los individuos dentro del grupo pueden tener diferentes órdenes de preferencias. El diseño de los estudios que minimicen entre individuo-variación, como se ha hecho en este estudio, se puede reducir la probabilidad de estas paradojas. Sin embargo, los datos muestran intransitividad a nivel de grupo, por lo que siempre deben ser tratados con cautela. En este sentido, la evidencia más fuerte de los procesos comparativos de valoración en el *Physarum polycephalum* viene de la violación de regularidad de los plasmodios. Las violaciones de regularidad a nivel agregado no se predicen al menos que algunos individuos dentro de la población verdaderamente violen la regularidad.

Dado que carecen de cerebros (o cualquier forma de tratamiento de la información centralizada), ¿cómo tomar decisiones los Myxomycota? Los plasmodios mixomicetos, como las colonias de insectos, son responsables de las decisiones colectivas, donde el comportamiento del colectivo es el resultado de la conducta de sus partes subyacentes. Cada moho mucilaginoso se compone de muchas pequeñas piezas, cada uno oscilan a una frecuencia determinada en parte por el medio ambiente local, y en parte por las interacciones con los osciladores adyacentes de tal manera que cada oscilador puede arrastran a los individuos cercanos a él.<sup>435</sup> El contacto con atractivos aumenta la frecuencia de oscilación mientras que el contacto con los repelentes de luz (es decir, sales) disminuye la frecuencia de las oscilaciones. Cuando un plasmodio detecta o entra

---

<sup>434</sup> La paradoja de Condorcet o paradoja de la votación es una situación señalada por el marqués de Condorcet a finales del siglo XVIII en el que las preferencias colectivas son cíclicas (no transitivas) aunque las preferencias individuales no lo sean. Lo anterior es paradójico porque implica que la voluntad de mayorías entran en conflictos entre sí, en otras palabras es posible que un procedimiento de elección falle el criterio «siempre-un-ganador». Cuando esto ocurre, usualmente se debe a que las mayorías en conflicto están formadas por diferentes grupos de individuos. Fuente: Wikipedia®

<sup>435</sup> Durham, A. C., Ridgway, E. B. (1976) *Control of chemotaxis in Physarum polycephalum*. Journal of Cellular Biology. Vol. 69. Nº 1, pp. 218-23.

en contacto con los alimentos, el aumento de frecuencias de oscilación en la región más cercana a la fuente de alimento causa biomasa al fluir hacia el atrayente (Durham y Ridgway 1976). El comportamiento del organismo en su conjunto resulta del comportamiento colectivo de los osciladores internos. Este mecanismo relativamente simple, aparentemente permite al plasmodium para procesar la información y tomar decisiones. ¿Cómo exactamente estos factores atan juntos para dar lugar a un proceso de toma comparativo se desconoce, pero es el foco de la investigación actual.

*Polycephalum Physarum*, que tiene un mecanismo de toma de decisiones descentralizada, violado IIA. Esto sugiere que los sistemas de toma de decisiones descentralizadas pueden ser susceptibles a IIA bajo ciertas condiciones. Se sabe muy poco acerca de cómo los componentes individuales del molde de limo evaluar opciones, ni tampoco nos entienden completamente el proceso de contratación, o cómo la información se propaga a través del plasmodio. Sugerimos que las diferencias en la organización de los sistemas de toma de decisiones colectivas, probablemente influyen en la medida en que el grupo se comporta racionalmente.

Curiosamente, incluso dentro de un grupo de tratamiento, limo moldes variaban en sus elecciones. Esto es particularmente sorprendente ya que hemos controlado para el peso, el estado nutricional y las diferencias genéticas. Sugerimos que parte de la variabilidad se observó surge de ligeras diferencias en los experimentos condiciones iniciales. Aunque se hizo todo lo posible para asegurar que los moldes de limo fueron igualmente en contacto con todas las opciones disponibles, no podemos controlar si algunas partes del moho de fango comenzaron a moverse más rápido que otros. Estas pequeñas diferencias en la condición inicial, combinada con la retroalimentación a través de mecanismos de reclutamiento de biomasa, en última instancia, podrían resultar en la variabilidad observada. Esta sensibilidad / sintiencia a las condiciones de partida es similar a la observada en el rastro de colocación las hormigas, donde las pequeñas diferencias entre el número de hormigas que visitan uno de los dos alimentadores de igual calidad resultó finalmente que un alimentador era seleccionado sobre el otro.<sup>436</sup> Nuestros resultados apoyan la idea de que las tomas de decisiones colectivas pueden ser muy sensibles a las condiciones iniciales.

Es notable que *P. polycephalum*, que pertenece a un reino completamente diferente de la vida y carece de un sistema nervioso central, utiliza los mismos procesos de toma de decisiones comparativos al igual que los organismos neurológicamente sofisticados. La ubicuidad de la toma de decisiones relativa a través de taxones independientemente de la complejidad neurológica sugiere que estos procesos no están limitados por determinados sistemas de procesamiento de información y pueden ser una característica intrínseca de la toma de decisiones biológica.

Tenemos otro ejemplo muy claro de que los organismos no neuronales pueden también tener en cuenta los puntos fuertes variables de diferentes alimentos claves. Cuando a un

---

<sup>436</sup> Sumpter D. J. T., Beekman M. (2003) *From nonlinearity to optimality: pheromone trail foraging by ants*. *Animal Behavior*. 66, 273–280

plasmodio se le da a elegir entre una fuente de alimentos a base de avena y una fuente de alimentación con base de yema de huevo, muestra una fuerte preferencia por la comida a base de yema de huevo (Reid, Beekman, Latty y Dussutour 2013). El equipo de Reid y Latty proveen al plasmodio con una elección entre una región que contiene las señales químicas de la exploración más allá de sus congéneres (que es repelente al organismo) y que lleva a un gran atractiva fuente de alimento a base de yema de huevo y una región sin esas señales químicas, sino que conduce a una fuente de alimento menos atractivo como la avena. Cuando los diferentes alimentos claves fueron detectables pero de forma débil (colocándolo a 4 cm de la ameba), las áreas del plasmodio que previamente habían sido exploradas por sus congéneres evitan elegir consumir el alimento base de avena bajo recompensa. Sin embargo, si las señales de alimentos se hicieron más fuertes mediante la colocación de las fuentes de alimentos más cerca del organismo (0,5 cm), entonces cambió su preferencia a ignorar el limo extracelular y alcanzar la comida muy gratificante basada en yema de huevo (Reid, Beekman, Latty y Dussutour 2013) . Así, el moho mucilaginoso realiza una decisión de comercio compensatorio si un área ha sido explorado y la fuerza de las diferentes señales de alimentos.

Por otro lado, se cree que las velocidades precisas en la toma de decisiones (SATs) son una característica fundamental del tratamiento de la información biológica, pero la mayoría de las pruebas de SAT procede de animales. Aquí, examinamos SAT en las decisiones de forrajeo de un organismo ameboide acelular: el moho mucilaginoso *Physarum polycephalum*. Los hongos gelatinosos se les dio una tarea de discriminación simple: seleccionar los alimentos de más alta calidad de un conjunto de tres opciones. Se investigó el efecto de dos factores de estrés, exposición a la luz y el hambre, la velocidad y la precisión de la toma de decisiones. También se examinaron el efecto de la dificultad de la tarea. Cuando se le presente una tarea de discriminación difícil, los individuos estresados tienden a tomar decisiones más rápidas que las personas no estresadas. Este efecto se revirtió en plasmodios con tareas fáciles de discriminación, donde los individuos estresados toman decisiones más lentamente que los individuos no estresados. Se han encontrado pruebas de SAT, de manera que los individuos que toman decisiones rápidas son más propensos a cometer errores costosos en la selección de la peor opción posible de alimentos. Nuestros resultados sugieren que la SAT se produce en una gama más amplia tasas que se había considerado.

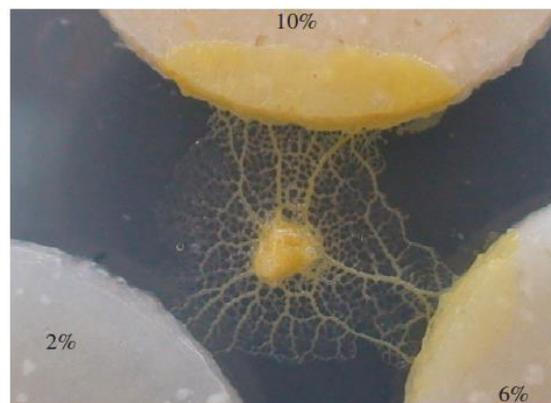


Figura 61. Un plasmodio 4,5 h en el proceso de toma de decisiones. Tenga en cuenta que la búsqueda de frentes se ha ampliado tanto en el disco del 10 % como el de 6 %, pero está en el proceso de ser retraído desde el disco 6 % (como se evidencia por el color más pálido). Latty y Beekman (2011)

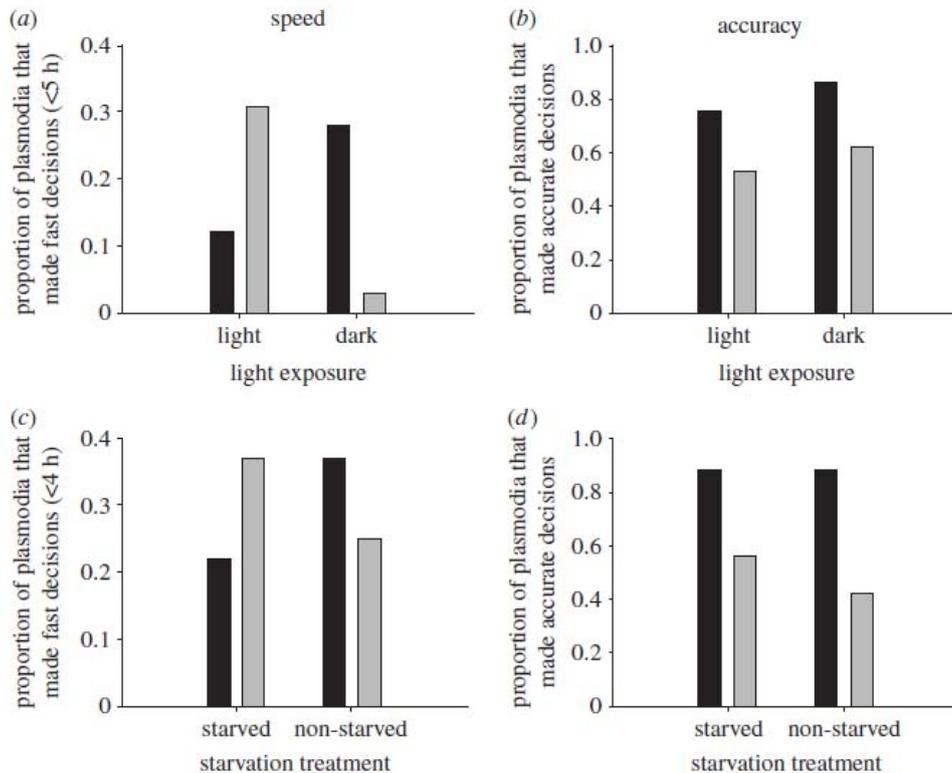


Figura 62. Muestra el efecto de los factores de estrés en la velocidad y precisión de la toma de decisiones en *Physarum polycephalum*. (a, c) El efecto de cada factor de estrés experimental ((a) exposición a la luz, (c) el hambre) en la velocidad de decisión. Cuando plasmodios fueron expuestos a un factor de estrés, ya sea a través de exposición a la luz o por hambre, las tareas de discriminación fáciles (barras negras) se completaron más lentamente que las tareas de discriminación difíciles (barras grises). Cuando plasmodios no estaban estresados (oscuro y no muerto de hambre), tareas de discriminación fáciles se completaron más rápido que las tareas de discriminación difíciles. (b, d) El efecto de cada factor de estrés ((b) la luz, (d) el hambre) en la precisión decisión. La decisión se consideró precisa si los plasmodios seleccionaban el disco de alimentos con la mayor concentración de nutrientes. Los plasmodios eran menos precisos cuando se presentaban tareas con discriminaciones difíciles que cuando se presentan con tareas de discriminación fáciles. Latty y Beekman (2011).

¿Por qué los individuos a veces hacen hincapié en la velocidad sobre la exactitud, dado que esta estrategia puede causar las personas a cometer errores? Al resolver una difícil decisión se consume mucho tiempo y el costo de los errores es bajo, entonces la mejor estrategia para un organismo puede ser tomar una rápida, pero potencialmente inexacta, decisión. Por ejemplo, las abejas que son rápidas pero inexactas recogen el néctar a una tasa mayor que los que son exactos, pero lentos. Para mixomicetos expuestos a la luz, la toma de decisiones rápidas, pero inexactas cuando el conjunto de elección es difícil (y el costo de los errores es baja), podría ser óptimo en cuanto disminuye la exposición del plasmodio a los efectos perjudiciales de la luz, proporcionando rápidamente el acceso a la sombra, es decir, a áreas de alimentación seguras. Un razonamiento similar se puede

aplicar al plasmodio muerto de hambre, donde una decisión rápida permite un acceso más rápido a los nutrientes importantes.

Nuestros resultados tienen implicaciones para una serie de taxones de importancia ecológica. Los hongos, en particular, son similares organizativamente al moho mucilaginoso en que ellos también utilizan un proceso de toma de decisiones muy descentralizado. Los hongos forman un componente muy importante de los ecosistemas del suelo y juegan un papel importante en la descomposición y el ciclo de nutrientes. Aunque el papel ecológico de los mixomicetos es menos claro, que se sabe que son depredadores de bacterias y hongos, y probablemente juegue un papel importante en la modulación de la descomposición (Fest 1987). Entre los animales, SAT juegan un papel importante en una amplia variedad de comportamientos que incluye la elección de pareja, interacciones depredador–presa, y alimentación. Los resultados de estas investigaciones sugieren que el SAT también puede estar presente entre los miembros importantes de la comunidad del suelo, lo que podría indicar un impacto mucho más amplio de la SAT que se suponía. Además también sugieren que el SAT puede ser una característica importante de procesamiento de la información en una amplia variedad de organismos, independientemente de su complejidad cognitiva.

Por otro lado, dicha independencia de la complejidad cognitiva también queda reflejada en el aprendizaje de la creación de redes mínimas de transporte, sean hormigas argentinas *Linepithema humile* como plasmodios *Physarum polycephalum* (Latty, Ramsh, Ito, Nakagaki, Sumpter, Middendorf, Beekman 2011) Por ejemplo, en la construcción de árboles de expansión mínima, o redes de Steiner. Este resultado es análogo a la composición de las redes de un conjunto de topologías básicas reportados por Nakagaki, Kobayashi y Nishiura (2004) para el *Physarum polycephalum*.

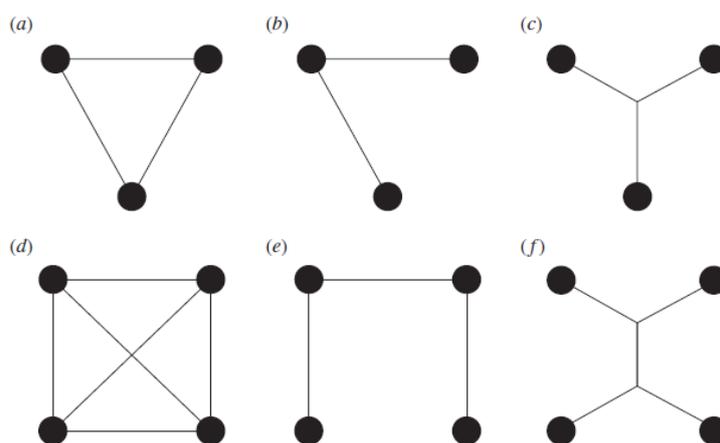


Figura 63. Redes Ideal para (a-c) tres y (d-f) cuatro nidos (puntos negros). (a, d) los gráficos completos, (b, e) los árboles de expansión mínima y (c, f) los árboles mínimos Steiner de la respectiva distribución de nidos. La gráfica completa minimiza la distancia media recorrida (DM) y tiene mayor robustez (tolerancia a fallos (FT)) y longitud total (LT) que el árbol mínimo Steiner y el árbol de expansión mínimo. El árbol mínimo Steiner minimiza la TL mientras que los árboles de expansión mínimos minimizan TL si no se permiten vértices adicionales. Tanto el árbol mínimo Steiner y el árbol de expansión mínimo tienen cero FT y superior MD que el gráfico completo. Latty, Ramsh, Ito, Nakagaki, Sumpter, Middendorf y Beekman (2011).

Debido a que el MD relativa, TL y FT relativos fueron aproximadamente los mismos para la configuración en triángulo (tres nidos) y en cuadrado (cuatro nidos), esta construcción por la composición local de las soluciones podría proporcionar una forma de conectar de manera eficiente nidos como el incremento del número de nidos de las hormigas. La cuestión sin resolver se encuentra en la razón de dicha construcciones. No se trata de un cerebro sea su causa, puesto que el plasmodio no tiene, pero eso no le impide generar dicho patrón de camino.

### **Memoria espacial sin cerebro**

Pero tampoco de impide tener una memoria espacial que mejora la capacidad de navegación de un organismo (Reid, Latty, Dussutour y Beekman 2012). Queda demostrado que el “descerebrado” mixomiceto *Physarum polycephalum* construye una forma de memoria espacial que evita áreas que ha explorado con anterioridad. Este mecanismo permite que el moho mucilaginoso resolver el problema de una trampa que requiere superar el plasmodio para alcanzar una meta quimioatrayente detrás de una barrera en forma de U (una prueba clásica comúnmente utilizado en robótica para la capacidad de navegación autónoma. El organismo debe contar con otros métodos distintos de detección del gradiente para escapar y llegar a la meta. Nuestros datos muestran que la memoria espacial mejora la capacidad del organismo para navegar en entornos complejos. Latty y colegas proporcionan una demostración única de un sistema de memoria espacial en un organismo no neuronal, apoyándose en la teoría de que una memoria espacial externalizada puede ser la precursora funcional de la memoria interna de los organismos superiores.

La clave para resolver el problema radica en la forma en que el mixomiceto se mueve alrededor y en la composición del rastro de baba que deja atrás. El plasmodio tiene varias partes diferentes, o las áreas que conforman su cuerpo, cada uno de los cuales responden de forma independiente a su entorno. Las diferentes partes se expanden y contraen, latiendo a un ritmo determinado en función de lo que se está viviendo. El calor, la luz o los alimentos provocan cambios en la tasa de pulsación que difieren de la tasa de otras partes del cuerpo del plasmodio. Estas diferencias en las tasas de pulsación son la causa de que el molde se mueva. A medida que se mueve el plasmodio, una capa de limo se deposita por debajo de su cuerpo para permitir el deslizamiento a través de material de la superficie. Los productos químicos del moco o limo también provocan cambios en el ritmo de pulsación, lo que explica cómo se puede evitar pisar sobre ella.

Ante la sospecha de que el plasmodio de alguna manera utiliza su rastro de baba como un dispositivo de memoria, el equipo llevó a cabo dos experimentos con trampas. La primera consistía en colocar al plasmodio en la trampa con un obstáculo en forma de Y con los alimentos colocados en cada extremo de la rama. Cuando una estera de limo se coloca en el camino entre el mixomiceto y la fuente de alimento, 39 de 40 pruebas con el plasmodio hizo caminos alrededor de los otros anteriores para llegar a la fuente de alimento. No repitió camino alguno.

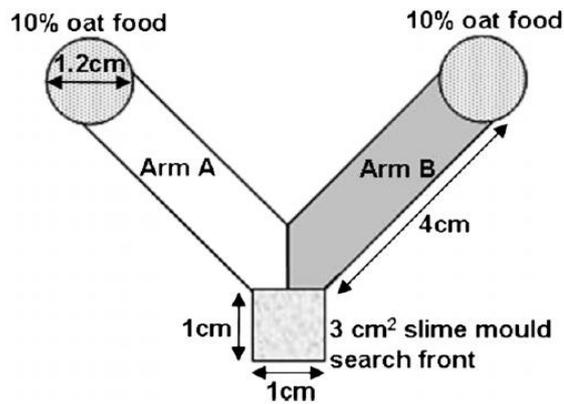


Fig. 64

Fig. 64. Y-labermintos que prueban la respuesta extracelular de evitación de limo. Una pieza de 3 cm<sup>2</sup> de plasmodio frontal búsqueda se coloca sobre una superficie de 1 cm<sup>2</sup> de 1% de agar. El plasmodio se les dio la opción de 1% de agar brazos (brazo A y brazo B) que conducen a las fuentes de alimentos de avena en polvo idéntica al 10% en peso / vol.

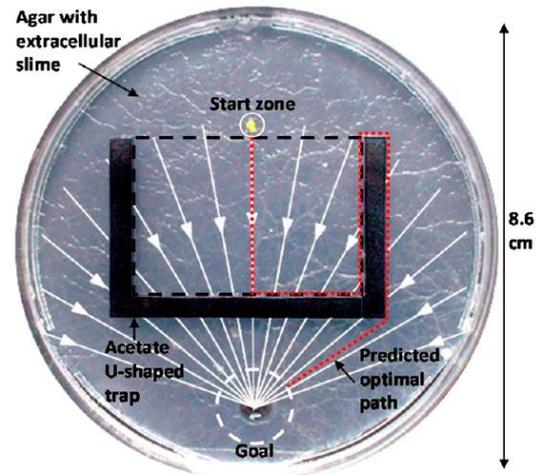


Fig. 65

Fig. 65. Configuración de la tarea de navegación con trampa en forma de U. La superficie del agar fue en blanco o revestido con limo extracelular. Una atractiva solución de un 2% (peso / vol) de glucosa se colocó en un pozo en el agar (el objetivo). Una pieza 1 mm<sup>2</sup> de plasmodio búsqueda se coloca frontalmente en la zona de inicio y se mezcla en los límites (cuadrados discontinua) de la trampa en forma de U de etilo por el gradiente de solución de glucosa (líneas blancas / flechas). La línea roja punteada muestra el camino óptimo predicho; la trayectoria mínima del plasmodio responde a quimiotaxis durante el uso de su sistema de memoria espacial externalizado para escapar de la trampa. Reid, Latty, Dussutour y Beekman (2012).

En el segundo experimento, se pusieron plasmodio *Physarum* en una trampa en la que se colocó un obstáculo en forma de U entre el plasmodio y una fuente de alimento . A medida que los plasmodios se dirigieron a la comida, se programó el tiempo que les llevaría conseguir trayectos alrededor del obstáculo. Se llevaron a cabo dos tipos de ensayos, el primero se les permitió a los mohos mucilaginosos moverse sobre una superficie normal. En el segundo, la superficie estaba cubierta de limo similar a al producido por el plasmodio, impidiendo que lo utilizara como un dispositivo de memoria. Cuando a los plasmodios se les permitió utilizar sus senderos, el 96 por ciento de ellos llegaron a la comida dentro de las 120 horas. Ese número se redujo a tan sólo el 33 % cuando se deja de navegar sin el uso de su rastro.

Estos resultados indican que el *Physarum polycephalum* utiliza su rastro de baba como un dispositivo de memoria. Éste ha sido el primer ejemplo de esa capacidad de memoria espacial en un organismo sin sistema nervioso.

## Conclusiones

### La biosemiótica como ciencia transdisciplinar

Después de los estudios efectuados en los múltiples campos de la biología evolutiva y del desarrollo, en torno a la comprensión de los organismos como sistemas abiertos a equilibrios complejos (Prigogine, I., 1955 / 1961, 1977), se ha conciliado la concepción de autoorganización en los sistemas vivos (Eigen, M., 1971) con la producción de sus componentes, y con la autoreferencia de los mismos, en función de la percepción del medio inmediato y de su sistema estructural, comprendidos como sistemas autopoieticos (Maturana, H., Valera, F. 1974, 1994). Esta conciliación ha ayudado no tan solo a establecer una idea de complejidad jerárquica de la organización (Pattee, H., 1973; Salthe, S. R., 1985, 2008) como agente autónomo en orden biológico al límite del caos (Kauffman, S., 1990, 1991), sino que también ha puesto en consideración la apertura hacia una comprensión de la fenomenología de los organismos vivientes desde su propia pulsión (Varela, F. J., 1992), fundamentadas en las ideas de Uexküll<sup>437</sup>.

A la vez que la biología ha ido profundizando de forma independiente entre los niveles estructurales (molecular, celular, bioquímica, biofísica, genética, proteínica, de desarrollo), las fisiológico-anatómicas, y la diversidad y evolución de los organismos, ha ido también necesitando de un replanteamiento interdisciplinario cada vez más complejo en el estudio de los organismos en interacción (ecología, etología y comportamiento). A medida que el estudio de la complejidad del conocimiento se ha ido ampliando, también lo ha hecho el modo de conocer. Por lo que se han establecido diferentes arquitecturas explicativas (biología de sistemas, biología modular) que van respondiendo a las cuestiones de interacción entorno- interior y las propiedades emergentes con enfoques holísticos (Kitano, H., 2001) pero que, a su vez necesitan de nuevas conexiones interdisciplinarias (bioinformática) de cara a responder a los descubrimientos que van surgiendo en la comunidad científica. Una de las necesidades con las que se ha topado desde el desarrollo teórico de la biología ha sido el poder ofrecer una interpretación coherente y consistente al múltiple desarrollo de lo vivo en todos los campos de investigación. Y el problema de dicha interpretación no ha sido

---

<sup>437</sup> "Como biólogo que soy, por ejemplo, desde muy pronto, antes de los nuevos desarrollos, me puse a leer a Uexküll, y estuve muy impresionado por su análisis de la relación entre el organismo y el medio ambiente. Más adelante, me hice una pregunta que, por lo general parece no ser seria, hasta que no se piensa hasta su conclusión lógica - sobre todo desde que los científicos actúan como filósofos: ¿Qué es la cognición como un fenómeno biológico?" Maturana, H. R. (1996) *Was ist Erkennen? Die Welt entsteht im Auge diciembre Betrachtens*. Goldmann Verlag. pp. 221.

Jacob von Uexküll entiende la vida como un "mundo vivido" (donde Hans Jonas prefiere la autoidentidad) [...] Por definirse a sí mismo de esta manera, conformar los dominios de sí mismo y del mundo, el organismo crea una perspectiva que cambia el mundo desde un lugar neutral para un Umwelt que siempre significa algo en relación con el organismo. Los organismos se puede decir que trasciende la neutralidad de la física pura y crear su afición. Sólo esta perspectiva orgánica en realidad tiene la condición de "mundo", solo que esto es real, porque la vida sólo puede actuar en la forma de un mundo intencional. La vida es así siempre subjetiva en el sentido fuerte de la palabra. Weber, A., Varela, F. J. (2002) *Life after Kant: Natural purposes and the autopoietico Foundations of biological individuality*. Phenomenology and the Cognitive Sciences, 1. pp. 97-125

resuelto aún habiéndose consolidado la teoría de la evolución de Darwin en las perspectivas de la síntesis moderna o en la evo-devo.

Dice Howard Pattee: “El problema fundamental de la teoría de los sistemas biológicos es de entender y representar las interacciones dentro de tales sistemas epistemológicos, es decir, sistemas que tengan dinámica de valor dependiente y una autodesignación con valor independiente que limita esta dinámica de manera que formen un organismo coherente”<sup>438</sup>

A partir de los años setenta, investigadores de diversos campos estuvieron estableciendo las posibles relaciones entre las transducciones de señales moleculares y su semiótica o estudio de la comunicación entre éstas y su respuesta biológica (Florkin, M., 1974; Krampen, M., 1981). Pero fue en la década de los noventa cuando el concepto de biosemiótica tomó cuerpo de investigación, después de los esfuerzos contenidos del semiólogo Thomas Sebeok y del médico Thure von Uexküll durante más de treinta años para consolidar una ciencia de que conecte la comunicación y el conjunto de signos y señales que se establecen a diferentes niveles de organización biológica (desde el molecular a los supraorganismos).

Dicha consolidación no sólo está en conexión entre semiólogos (Sebeok, Peirce, Kull, Lotman, Uexküll) y biólogos (Hoffmeyer, Emmeche, Patee, Weber, Rütting, Sharov, Kull, Markoš, Barbiery, y Witzany entre otros). También existe conexión entre filósofos de la ciencia (Emmeche, Peirce, Chebanov, Stjernfelt, Markoš, Brier, y Etxeberria entre otros), matemáticos (Thom, Farina, Scozzafava, Morri), físicos (Tarbosky, Christensen, Patee, Nicolescu), entre lingüistas (Favareau) cibernéticos (Brier, Löckenhoff, Emmeche) y más colegas de diversas disciplinas.

La interrelación entre las múltiples disciplinas científicas que se interesan en el desarrollo epistemológico de la biosemiótica está comprendiendo que, para que la conectividad entre dichas disciplinas provoque una emergencia de significado compacto y coherente respecto a una mejora de la comunicación científica de la comunicación biológica, es urgente trascender la interdisciplinariedad. Pues no tiene sentido mantenerse en el nivel de intercambio de materias disciplinarias únicamente en cuanto a relacionar patrones de modelos científicos usufructuables (en sus límites tanto semióticos como disciplinarios). En necesario establecer una plasticidad cognoscitiva (Nicolescu, 2008) para obtener niveles holísticos de desarrollo científico que permita una hermenéutica biológica significativa.

La capacidad transdisciplinar permite una mayor transacción y coordinación de criterios científicos de diferentes naturalezas epistemológicas adaptando un contraste profundo de acuerdo a una contemplación de lo complejo como un todo. Y la biosemiótica establece la condición de posibilidad de comprender la fenomenología biológica como

---

<sup>438</sup> Pattee, H.H. (1978) *Biological Systems Theory: Descriptive and Constructive Complementarity*. En G.J. Klir (ed.) *Applied General Systems Research*, New York: Plenum, Págs. 511-520.

un todo significativo en cada una de sus jerarquías interpretativas de los sistemas vivos, llamado también “biohermenéutica” (Chebanov, S. V, 1999).

### **Cognitismo en los hongos mucilaginosos**

Uno de los ejemplos más claros y, a su vez más sorprendentes de comportamiento inteligente en biología cognitiva ha sido el revisado a través de auténticos hongos mucilaginosos o mixomicetos. Hemos conocido más de cerca al *Physarum polycephalum*, una especie de mixogastreas o mixomicetos que varían su estructura plasmodio u ameboide a esclerocio dependiendo de las variables favorables o desfavorables del entorno y de sus necesidades alimenticias. Cuando su estado es de ameba, son auténticos plasmodios polinucleares con una sola membrana, lo que mantienen una unidad topológica, algo significativo en su descripción como sistema autopoietico.

Se ha demostrado que el *Physarum polycephalum* puede encontrar la ruta más corta a través de un laberinto para localizar las fuentes de alimentos colocados en las salidas, y así absorber la máxima cantidad de nutrientes en el menor tiempo posible (Nakagaki, Yamada y Toth 2000; Nagakaki 2001)<sup>439</sup>. Esto sugiere que la célula es capaz de un comportamiento “inteligente, incluso en situaciones complicadas en que es difícil optimizar las tareas de supervivencia. Dos son las cuestiones importantes que plantea esta hipótesis: ¿de qué modo es este comportamiento y cómo se llegó a una solución “inteligente”?

La red de transporte en hongo mucilaginoso plasmodial es un sistema útil para abordar estas cuestiones. El plasmodio *Physarum polycephalum* es un agregado de protoplasma con una red de elementos tubulares y nutrientes a través del cual circulan las señales químicas, cuya geometría está relacionada con la comunicación interna. Por otra parte, los tubos actúan como “canales”, lo que permite al organismo a navegar por su entorno, y puede ser desmontado y reensamblado en pocas horas en respuesta a los cambios del entorno. Cuando se presentan en diversas posiciones muchas pequeñas fuentes de alimentos copos de avena a un plasmodio hambriento, éste se esfuerza para llegar a todos ellos; como consecuencia de ello, sólo unos pocos tubos están en contacto con cada fuente de alimento. El organismo trata de optimizar la forma de la red para facilitar la absorción de los nutrientes disponibles. Sin embargo, esto podría ser difícil de lograr cuando múltiples fuentes de alimentación se presentan debido a la limitación de la masa corporal del organismo.

Los efectos de dos fuentes de alimentación han sido previamente estudiados, y la minimización de la longitud total de la red resultó tener un papel importante. Esta red en forma de cuerpo permite ciertas necesidades fisiológicas que deben cumplir: 1º La absorción de los nutrientes desde la fuente de alimentos de la forma más eficiente

---

<sup>439</sup> Mientras que la velocidad de locomoción del *Physarum polycephalum* es de 1cm/h, el transporte de material intracelular en los tubos que se generan con mayor espesor aumenta hasta alcanzar una velocidad máxima de 1mm/s.

posible, porque casi toda masa corporal se encuentra en las fuentes de alimentación para permitir la absorción; 2° El mantenimiento de la conectividad y la comunicación intracelular en todo el organismo, y 3° La reunión de la limitación de los recursos de la masa corporal. La red formada se considera como una solución para los problemas de supervivencia del organismo.

Contrariamente a esto, si la comida es abundante, el organismo finalmente se divide en dos piezas sobre las dos fuentes de alimentación. Incluso este caso, sin embargo, justo antes de la división, el organismo traza tan sólo la distancia más corta. Por lo tanto, la conexión más corta aparece una vez como forma transitoria y por último es desconectado, entonces los resultados de la desconexión es la separación del organismo. Los puntos clave del comportamiento inteligente del *Physarum polycephalum* se encuentra en, primero, que para alcanzar los pedacitos de avena decide realizar la ruta más corta posible para obtener el alimento de cada fuente; y segundo, que para realizar la trayectoria tiene que predecir su ruta, pues no establece rutas a forma de ensayo-error, sino que todo lo hace a la primera. Para generar dicho movimiento es necesario un sistema de control de la información del Umwelt, y un sistema de comando que tome las decisiones.

Para estudiar los mecanismos de aprendizaje de memoria y anticipación en los *Physarum polycephalum*, éstos fueron expuestos a condiciones adversas presentadas con tres pulsos consecutivos a intervalos constantes. De ese modo redujeron su velocidad de locomoción en respuesta a cada episodio. Cuando posteriormente los plasmodios fueron sometidos a las condiciones favorables, ellos espontáneamente redujeron su velocidad de locomoción a tiempo de que el siguiente episodio desfavorable pudiera haberse producido. Esto implicaba la previsión de la inminencia de los cambios ambientales. De este modo, Nakagaki y sus colegas han explorado los mecanismos que subyacen en un comportamiento anticipatorio a partir de una perspectiva de sistemas dinámicos no lineales (Nakagaki, Kobayashi, Nishiura y Ueda 2004).

Sin embargo, la conclusión que se ha llegado es que el organismo es capaz de recordar los cambios periódicos que no ha experimentado antes. Esto indica que el organismo tiene una capacidad generalizada para el aprendizaje, la memoria y la anticipación, independientemente de los detalles de la periodicidad.

Podemos hacer ahora un cuadro top-down de cómo el plasmodio puede recordar los cambios periódicos, y exponer una “memoria espacial” externalizada (Reid, Latty, Dussutour y Beekman 2012). Nuestro protagonista ameboide reconoce las señales que se percata en sus órganos receptores de la membrana protoplasmática y los lleva al subsistema regulador. Dicho subsistema regulador de transducción de señales, son independientes, en parte de ciclos metabólicos. Por un lado su parte dependiente recibe las señales como óptimas para la alimentación, provocando el famoso “ensalivamiento pavloviano de las amebas” segregando baba de alegría. Pero por el otro lado pone en marcha los mecanismos de “motiligencia” (Takamatsu, Ito, Okamoto, Gomi, Arafune,

Watanabe, Tero y Nakagaki 2009) ¿Cómo lo hacen? Éstos recogen las señales en los filamentos de actina-miosina y en las tubulinas con su compleja fosforilación de ADP en ATP hidrolizado, con la propiedad buffer que amortigua biofísicamente, como también retiene bioquímicamente la señal “memorizada” para transducirla. Mientras las proteínas asociadas a las contracciones de los filamentos de actina-miosina confieren la energía adicional para las consecuentes oscilaciones que permiten el traslado del ATP a las puntas conductoras del plasmodio – a través de los microtúbulos en su tensegridad más óptima para la potenciación de las ramificaciones fractales que se expanden cubriendo su alimento preferido... una yema de huevo!!!. Y lo hace tomando el recorrido que le permite esquivar los obstáculos, aunque por ello tome medidas necesarias de las condiciones homeodinámicas del entorno para tomar una decisión de alcanzar la preciosa yema de huevo, a pesar de los rayos de sol que, intermitentemente le acosa por el balanceo de una rama de un árbol que mantiene sus hojas meciéndose como un péndulo caótico. El panorama es complejo, pues el ambiente es ciertamente adverso a nuestro plasmodio por su baja humedad relativa del ambiente. Pero eso no le tira hacia atrás, más bien le empuja el hambre – gran aliado de la inteligencia según Turró (1912; 1918) y busca el mínimo trayecto que puede recorrer para alcanzar esa yema de ese huevo roto que nos llama tanto la atención... Y lo hace, recorriendo una triangulación de Delaunay para optimizar su desplazamiento, sin agotar sus recursos energéticos (Shirakawa, Adamazky, Gunji y Miyake 2009).

Esta aventura de nuestro plasmodio querido, ofrece claramente signos de múltiples procesos cognitivos mínimos para su objetivo. Y está claro que quien ve los procesos cognitivos no es quien lo vive sino el observador que lo interpreta con la mayor coherencia que le permite sus procesos meta-cognitivos. Tan sólo el observador puede observar lo observado, sin poder vivir como el plasmodio su “sintiencia” y su percatación del entorno. Sólo con nuestro instrumento cognitivo, podemos alcanzar a hacer una extrapolación fenomenológica que distinga y analice los procesos cognitivos mínimos que unen al observado (el plasmodio) con el observador (el creador de este trabajo).

Tenemos no sólo la información, sino también la capacidad de transducirlo en conocimiento significativo y transdisciplinar para explicar con la robustez que ofrece los datos y su correlación de interpretaciones basadas primeramente en la biología de sistemas para pasar a una biosemiótica comprobada por las observaciones tanto supervenientes como subvenientes de las descripciones multidisciplinares. De este modo se ha ido generando una nueva descripción interdisciplinar del conocimiento de los sistemas vivos complejos en su límite de bajo nivel de observación biológica. No hemos dejado de ofrecer ejemplos vivos de observaciones en la historia de la biología, en la historia de la protistología y en la historia de la biología cognitiva que han mantenido su coherencia a lo largo de los años. Con ello hemos llegado a osar realizar una aproximación a la biosemiótica desde el respeto interdisciplinar anterior para generar un discurso filosófico-científico transdisciplinar. Esta aproximación biosemiótica ha generado una propuesta de una biohermeneutica sólida para presentar

los procesos cognitivos observados y estudiados en los mixomicetos, especialmente en el plasmodio *Physarum polycephalum*. Mencionamos también con respeto pero con carencia de espacio y de tiempo al pseudoplasmodio multicelular *Dictyostelium discoideum*. Al igual que al *Physarum polycephalum*, su estudio requiere de otro trabajo de investigación de la misma magnitud que la presente.

Procesos cognitivos que han tenido su amplia discusión entre la conducta adaptativa de los agentes autopoieticos (Barandarian, Di Paolo y Rohde 2009; Barandarian y Moreno 2006) y la condición de posibilidad de los procesos cognitivos en la agencia adaptativa fundamentado por las formas de regulación (Bich, Mossio, Ruiz-Mirazo y Moreno 2015) de los subsistemas autopoieticos independientes de los procesos metabólicos, pero dependientes de las recepciones de señales tanto exógenas como endógenas, tan fundamental para concebir la posible cognición (Bich y Moreno 2013, 2015)

Aunque los resultados descritos en este trabajo se obtuvieron a través de auténticos hongos mucilaginosos – o mixomicetos -, los organismos procariotas, y alimento de los plasmodios: las bacterias, pueden demostrar también un comportamiento “inteligente” con un mecanismo simple de aprendizaje y de memoria en términos de dinámica no lineal. La perspectiva de la dinámica no lineal podría ser la clave para revelar el secreto de cómo los sistemas biológicos de superar los retos para su supervivencia (Takamatsu, Takaba y Takizawa 2009).

Es interesante saber que los estudios de dinámica no lineal de Nakagaki, introducidos en este trabajo comprenden un comportamiento de osciladores multirítmicos en el estudio de la motilidad (Kobayashi, Tero y Nakagaki 2006). Se puede considerar que los plasmodios *Physarum polycephalum* actúan como un sistema de osciladores acoplados, basándose en la teoría de bifurcación de Hopf y que resuelve algunas de las propiedades simétricas definidas en la dinámica oscilatoria de concentración de ATP o de  $Ca^{+}$ , el grosor del plasmodio y el flujo protoplasmático<sup>440</sup>.

Como dijo el padre de la biosemiótica, Jakob von Uexküll, a propósito del plan de significación de los mixomicetos: “Todo ser vivo se haya constituido, como todos sabemos, aunque con facilidad lo olvidamos, en oposición a todos los mecanismos, no de partes, sino de órganos. Un órgano es siempre un producto formado por células vivas, cada una de las cuales poseen un sonido propio. El órgano como totalidad tiene su sonido orgánico, que es su sonido de significación” (Uexküll 1940). Este “sonido de significación” o “sonidos del yo” (ich-ton) – como lo denominó Uexküll - serian comprendidos como los aspectos semánticos de las oscilaciones multirítmicas del propio sistema (de los órganos y del organismo su totalidad) en su desplazamiento (Kishimoto 1957a, 1957b; Miyake et al 1993) y en su desarrollo (Takamatsu, Takaba y Takizawa 2009), desde una perspectiva “enactiva” y “subjetal”<sup>441</sup> de la interacción

---

<sup>440</sup> “Todo cuanto significa vida está ligado al protoplasma” (Uexküll 1930/1944) Uexküll, J. von (1930) *Die Lebenslehre*. Potsdam: Müller und Kiepenheuer Verlag, und Zürich: Orell Füssli Verlag.

<sup>441</sup> Estableciendo por eso una relación entre la “enacción autopoietica”, en tanto que es la representación o performance del organismo y, a su vez la “emergencia” del mundo a partir de un trasfondo de comprensión a través de “círculos funcionales” cognitivos y de retroalimentación en “conformidad a un

entre su Innenwelt - o mundo fenomenológico del organismo – y su Umwelt – o “campo de percepción multisensorial del entorno”<sup>442</sup>. Por lo que habría una descripción biosemiótica de las oscilaciones con la caracterización de agente en su estatus autopoiético, y por lo tanto propioceptivo (gracias a proteínas contráctiles como la actina, la miosina y la tubulina, etc.), interoceptivo (gracias a las señales intracelulares como AMPc, GTPc, Ca<sup>+</sup>, PIP3, etc.) y exteroceptivo (gracias a la quimiotaxis, la haptotaxis, o la termotaxis, etc).

*“No hay que pasar por alto el hecho de que nosotros adscribimos a la ameba del mixomiceto un Umwelt, aún cuanto limitado, propio de todas las amebas, en el cual las bacterias se hacen notar como portadores de una significación en su Umwelt, y además son percibidas y creadas”* (Uexküll 1940). Estas bacterias que forman parte del Umwelt de los mixomicetos como portadores de significación alimenticia por quimiotaxis, también presentan comportamientos inteligentes de comunicación, y de cooperación en su agregación y desplazamiento.

### **La inteligencia social de las bacterias**

Como hemos visto con los mixomicetos, el desarrollo organizativo y coordinativo de la conducta de los organismos depende de la comunicación con su entorno, tanto abiótico (factores ambientales y sustancias del medio inmediato) como biótico (entre organismos de la misma especie o de especies y/o reinos diferentes). En el caso de las bacterias, los procesos comunicativos que se han estudiado son de tres tipos: intra, inter y metaorganísmico (Witzany 2008a). Las bacterias pueden distinguir entre señales específicas de especies y señales que son capaces de modular conductas interespecíficas, permitiendo de este modo coordinar conductas concretas de la especie, como de diversas especies.

En condiciones normales de crecimiento, las bacterias viven en comunidades jerárquicas muy complejas. Para poder construir dichas comunidades o colonias, han de ejercer conductas cooperativas en las que algunas de las células de forma altruista ofrecen su vida para la alimentación de otras en las formaciones de cuerpos fructíferos, como ocurre por ejemplo con los *Myxococcus xanthus*. Los patrones complejos de formación de una colonia emergen a través de interacciones basadas en la comunicación entre bacterias individuales de la colonia (Ben-Jacob 2009). Las células individuales asumen nuevos rasgos cogenerados y habilidades que no están pre-almacenadas en la información genética de las células, es decir, que no toda la información requerida para responder eficientemente a todas las condiciones del entorno están almacenadas

---

plan”, y la “subjectualidad o *sujetidad*” (subjectness) de Jesper Hoffmeyer (1998) en la que la acción con la que el sujeto crea un mundo propio permite al mismo tiempo su autocreación. De este modo se evita la connotación solipsista que tiene la subjetividad, y legitima la fundamentación fenomenológica de la vida del agente.

<sup>442</sup> Definición transdisciplinar del concepto de Umwelt de Jakob von Uexküll, producido por la suma de todos los círculos funcionales del sujeto en actividad en tiempo presente, según las estructuras morfológicas (Baupläne) de cada sujeto, conformadas según el plan (Planmäßigkeit) constructivo de autoorganización.

genéticamente. Esto responde a una afirmación de Gregory Bateson de que el ambiente ejerce un impacto directo en el patrimonio genético de la población, pero no es cierto de que el impacto ambiental pueda gravitar en los genes de cada individuo de forma genética<sup>443</sup>.

Cuando una célula recibe una señal a través de un receptor, se inicia una serie de pasos en una red interna de interpretación, que puede llevar un factor de transcripción para activar una zona de su genoma. Esto a su vez puede activar una red de genoma completo. Así, el significado de una señal depende de las complejas interpretaciones hechas a cabo por la célula receptora. El contenido informativo de la señal se ve reforzado a través de un mapeo de interpretación. Pero no todo el contenido informativo requerido para responder con eficiencia a todas las condiciones del Umwelt viene almacenado o preestablecido en el código genético.

Para resolver la incompletitud informativa, las bacterias evalúan dicho problema a través de detección de colectivos (collective sensing), recordando la información almacenada de la experiencia pasada (memoria epigenética<sup>444</sup>), y luego ejecutan la distribución del procesamiento de información de un colectivo entre las  $10^9$  y  $10^{12}$  bacterias agrupadas en la colonia: la transformación de la colonia colectiva en un supra-organismo es lo que Ben-Jacob denomina un “super-cerebro” (Ben-Jacob 2009). Un super-cerebro compuesto entre  $10^9$  y  $10^{12}$  “nanocerebros” de la morfología de un pelo. Se trata de unas fibras en forma de bobinas  $\alpha$ -helicoidales receptoras de quimiotaxis bacteriana conservadas en los dominios citoplasmáticos. Cada unidad de señalización (que conforma el super-cerebro) parecen ser un campo de varios miles de millones (según Ben-Jacob) de elementos receptores helicoidales, embalados en un paquete de 100 nm de diámetro aproximadamente, cuya dinámica arquitectónica sigue una lógica determinada por las reglas de asociación entre TSCT (Stock et al 2000) como la CheW, la CheA y la CheY (el receptor se señales, el donante de fosforilo - la histidina quinasa - y su regulador de respuesta – una proteína mensajera del ácido aspártico-) y el andamiaje de fibras receptoras  $\alpha$ -helicoidales.

El comportamiento inteligente de las bacterias despierta la atención a los actuales estudios biosemióticos (Witzany 2008a, 2008b). Las bacterias han desarrollado capacidades de comunicación compleja (por ejemplo, el quórum-sensing, señalización quimiotáctica y el intercambio de plásmido) para auto-organizarse cooperativamente en colonias altamente estructuradas con elevada capacidad de adaptación del medio ambiente. Eshel Ben Jacob y sus colegas (2006) propusieron que la bacteria use su

---

<sup>443</sup> Bateson, G. (1979) *Espíritu y Naturaleza*. Amorrortu Editores, 2006, 2ªed. 3ª reimp. Buenos Aires, pp. 55-56, 132 y 144.

<sup>444</sup> Recientemente se ha sugerido que las bacterias también poseen memoria epigenética del pasado, que permite realizar un seguimiento de cómo se manejan encuentros previos con antibióticos. Aprender de experiencias de las bacterias y así poder hacer frente mejor a un segundo encuentro con el mismo antibiótico como se refleja por el hecho de que la colonia se expande más rápidamente y adquiere un patrón más complejo. Este efecto puede ser borrado por el crecimiento en condiciones neutras. Una posibilidad es que este efecto esté relacionado con un cambio genético de la población. Otra posibilidad implica una herencia epigenética al nivel del genoma (Ben-Jacob, Shapira y Tauber 2006).

flexibilidad intracelular, participando en redes de transducción de señales y en la plasticidad del genoma, para mantener colectivamente comunicación lingüística: la interpretación propia y colectiva de señales químicas (sintaxis), el intercambio de mensajes químicos (semántica) y los diálogos (pragmático). El sentido de la comunicación basada en permisos de identidad colonial, la determinación intencional (por ejemplo, a partir de autoinductores o feromonas para el cortejo de apareamiento), la alteración deliberada de la estructura de la colonia (por ejemplo, formación de cuerpos fructíferos), la toma de decisiones (por ejemplo, esporas), el reconocimiento y la identificación de otras colonias, son funciones que podría empezar a asociarse con una inteligencia social bacteriana. Esa inteligencia social, en caso de que existan, sería necesario ir más allá de la comunicación para abarcar el proceso desconocido intracelular adicional para generar memoria de herencia colonial y un contexto común del genoma.

El criterio de comunicación célula a célula, en este caso en las bacterias, conlleva los procesos de transducción y decodificación de sus señales - un tipo de vocabulario semioquímico - a través de componentes como las homoserina lactonas LuxI y LuxR – en el caso de las *Vibrio fischeri* - para la autoinducción o quorum sensing, o la serina-treonina quinasa como receptores intracelulares capaces del factor de crecimiento transformante (en la formación de genes que regulan y controlan los procesos mitóticos y meióticos) y de regulador de la presión con el entorno en el caso del *Bacillus subtilis* (Kang et al 1996), aparte de colaborar en procesos neurológicos e inmunológicos (García Martínez 2007)<sup>445</sup>. El profesor Klaas J. Hellingwerf expone que al estudiar las características de transferencia de señales en las bacterias, éstas presentan características funcionales supervenientes en organismos superiores, como la memoria, el aprendizaje y la inteligencia de forma rudimentaria pero declarable y distinguible (Hellingwerf 2005) y que pueden no sólo imitar características típicas de redes neuronales, sino que determinadas proteínas que intervienen tanto en la comunicación bacteriana para el crecimiento o su paralización como en la detección de luz (Barends et al 2009), también son actuantes en procesos neuronales, como la neuroplasticidad, y como potenciadores cognitivos en el caso de inhibidores de la fosfodiesterasa como puede ser la vinpocetina (Medina et al 2006)<sup>446</sup>. En este último caso <sup>447</sup> estamos ante un sistema de dos

---

<sup>445</sup> Los efectos beneficiosos de la serina - treonina quinasa es la regulación de la supervivencia celular, fosforilando las proteínas pro-apopticas inhibiendo su actividad. También participa en fenómenos de neuroprotección por factores tróficos, contra la degeneración de las intraneuronas y de las neuronas de proyección estriatales, y en la diferenciación neuronal. La serina - treonina quinasa AKT, conocida como proteína quinasa C (PKC) contribuye a diferentes funciones celulares, incluyendo el metabolismo de nutrientes y la regulación de la transcripción, aparte de ser considerada como el regulador esencial de la proliferación y la supervivencia celular. Su disfunción o mutación contribuye a la apoptosis neuronal y celular, en la enfermedad de Huntington y de Alzheimer.

<sup>446</sup> El inhibidor de fosfodiesterasa tipo 1 (PDE1), se ha demostrado efectivo para facilitar la potenciación de largo plazo, mejorar la dinámica estructural de las espinas dendríticas, mejorar la recuperación de la memoria, y mejorar el desempeño en pruebas cognitivas en los seres humanos. Aunque estos estudios demostraron la eficacia de la vinpocetina en la mejora de la plasticidad en los sujetos normales, poco se sabe acerca de la efectividad de los inhibidores de PDE para mejorar la plasticidad en los casos de deterioro cognitivo grave.

componentes de transducción de señales (TCST), en los que ciertas moléculas convierten un mecanismo de estímulo químico en una señal de respuesta celular específica, ofreciendo un cambio en la función celular. Se trata de un mecanismo sensoriomotor, que actúa también como una forma molecular de memoria requerida para la quimiostasis. Está mediado por un par de proteínas que consisten en un sensor (S) o receptor y un regulador de respuesta (RR) adaptativa. Percepción y adaptación son dos líneas de actuación de señalizaciones, a través de lo que Uexküll denominaba “circuito funcional” o feedback sobre los receptores bacterianos. Curiosamente, algunos de los TCST implicados en la *E. coli* (y, por tanto en las procariontas), también lo están en algunas eucariotas – como en los mixomicetos –, actuando también en redes neuronales, como mecanismo de acoplamiento de base estímulo-respuesta para permitir que los organismos detecten y respondan a los cambios del Umwelt, es decir, del medio circundante el cual es “portador de significación” (Uexküll 1940). Es el caso de la proteína histidina quinasa que, actuando como transmisor en la *E. coli*, también interviene como regulador de respuesta en la ósmosis de los mixomicetos (Shuster et al. 1996; Stock)<sup>448</sup>.

### **Transferencia de información e irritabilidad celular: El proceso cognitivo mínimo y la ley de Weber-Fechner<sup>449</sup>**

Hemos visto que tanto en hongos mucilaginosos como en las bacterias existe procesos cognitivos que desentrañan comportamientos inteligentes tanto en el ámbito de la memoria y reconocimiento de patrones (mixomicetos) como en el ámbito social (bacterias). De hecho hay más estudios que observan lo que Pier Luigi Luisi, y B. S. Müller denominan “mínimo cognitivo” (Müller, di Primo y Lengeler 2001) permitiendo establecer diferencias entre sistemas vivos con sistemas no vivos (como vacuolas o micelas), al igual que la co-emergencia de la unidad autopoietica con la actividad cognitiva (Luisi 2006). Una de las cosas que es importante tener en cuenta es que no existe un foco o núcleo inteligente, sino que se trata de una emergencia en el propio sistema. Emergencia que podría originarse en actividades bioquímicas teleonómicas (Kováč 2006) propias de sistemas autopoieticos, como el “reconocimiento molecular”. Estas consideraciones nos permiten sumergirnos a una perspectiva biosemiótica de primer nivel (Matsuno 2008) donde la transducciones de señales bioquímicas convierten en éstas en información reconocible, y por tanto sensible a nivel macromolecular del entorno, como las transiciones reológicas de sol a gel del citoplasma (Sato, Wong y Allen 1983).

---

<sup>447</sup> En el caso de inhibidores de fosfodiesterasa, tenemos la HAMP dominio (histidina quinasa, guanilato ciclasa, proteínas de metilo vinculante, fosfatasa) y la DHKA como modelos de sistema de dos componentes de transducción de señales que son inhibidores de fosfodiesterasa.

<sup>448</sup> El moho mucilaginoso *Dictyostelium discoideum* contiene al menos 11 histidina quinasa “HK” (DOKA, DHKA -D y ESTs) que participan en una serie de actividades que incluyen la respuesta osmótica y el desarrollo. Una de ellas es un HK híbrido DHKA de factor importante en la osmoregulación, fosforilando el Regulador de Respuesta RegA, causando la inhibición de la actividad de la fosfodiesterasa AMPc-dependiente de RegA, y aumentando los niveles de AMPc, que a su vez, regulan la actividad de la proteína quinasa A.

<sup>449</sup> Este apartado surge del artículo del autor Castro, O. (2011) *La biosemiótica y la biología cognitiva en organismos sin sistema nervioso*. Ludus Vitalis, vol. XIX, num. 36, 2011, pp. 47-84.

Ahora bien, hemos de tener en cuenta un tema capital en estas actividades de reconocimiento de información, y es el propio concepto semántico de información. La semántica de las señales (y, en general, el lenguaje) se rige por el enriquecimiento (Werner y Vedral 2010). El significado enriquece el contenido de la información de una señal. Pero como dice Bateson la información consiste en diferencias que establecen una diferencia<sup>450</sup>.

Según comenta Vlatko Vedral, en la adición de información, éste permite respuestas muy sofisticadas a través de sencillas señales. Por lo que *la información contenida en un mensaje intercelular no está contenida en la señal*, en la probabilidad de la señal de ser enviada, o su valor sorpresa para el receptor. Por lo tanto, la teoría de Shannon es casi irrelevante a la información y la comunicación en la comprensión del desarrollo procesos. Argumenta Vedral que el significado de un mensaje está determinado por cómo afecta a la información y estado intencional del agente. Los agentes coordinan sus acciones mediante el uso de la comunicación para ajustar sus respectivas estrategias para que se cohesionen y así lograr sus objetivos de enclavamiento. Pero esto tiene poco que ver con la probabilidad de una señal. Por lo que la teoría de Shannon no dice nada sobre el significado y la comprensión del lenguaje.

Esto nos lleva de nuevo a la idea de Bateson que, siendo la información de naturaleza relativa, la diferencia no está situada en el tiempo ni en el espacio (no está contenida en la señal). Esto nos acerca a un tema que está ligado a la cuantificación de la cognición. Esto quiere decir que existe un límite en el reconocimiento de la diferencia de estímulos abióticos o bióticos del Umwelt donde no hay procesamiento. Ha de haber, por fuerza, un umbral de gradiente por debajo del cual el gradiente no puede ser percibido; y por lo tanto ha de existir una ley que rija el umbral mínimo de percepción que permita las tres condiciones indispensables que defina a un agente: su individualidad, la asimetría interactiva y la normatividad (Barandiaran, Di Paolo y Rohde 2009). Una ley “superveniente” o un equivalente homeomórfico de la *ley de Weber-Fechner* (Cope 1976; Copelli 2002), en la que el menor cambio discernible en la magnitud de un estímulo ha de ser proporcional a la magnitud del estímulo:  $s = k \ln (A/A_0)$  que relaciona la experiencia sensitiva ( $s$ ) con la activación sensorial ( $A$ ), donde  $k$  es una constante y  $A_0$  es el nivel mínimo de activación sensorial en el cual no se presenta experiencia. En el progreso del estudio de la ley de Weber–Fechner, Stanley Smith Stevens (1906-1973) propuso una extensión de la misma denominada ley de Stevens (Stevens 1957), una ley de potencia  $\psi = k\varphi^\beta$  que relaciona la magnitud “subjetal”<sup>451</sup> del estímulo ( $\psi$ ) con la intensidad ( $\varphi$ ) y la naturaleza de la estimulación ( $\beta$ ) que se describe en dos clases de continuo sensorial: un continuo metatético o cualitativo que suponen variaciones en la cualidad o localización sensorial, y un continuo protético o cuantitativo que suponen variaciones en la magnitud sensorial.

---

<sup>450</sup> Bateson, G. Opus cit. p. 111.

<sup>451</sup> En la definición ofrecida por Stanley Smith Stevens (Stevens 1957) se trata de la magnitud de la sensación subjetiva provocada por un estímulo. Estimo conveniente reemplazar la subjetividad por el criterio de “subjectness” o “subjectualidad” de Jesper Hoffmeyer.

Curiosamente, estas leyes psicofísicas estudiadas desde sus inicios<sup>452</sup> para la cuantificación objetiva de una sensación subjetiva en la psiquis humana, fue extrapolada ya en 1884 a la irritabilidad de organismos tanto unicelulares (bacterias y mixomicetos) como en las plantas gracias a Wilhelm Pfeffer (1888).

Pfeffer observó que si una bacteria se mueve hacia el gradiente de un atrayente, más energía disponía la bacteria para continuar acercándose al atrayente. Pfeffer hizo diversas mediciones entre las concentraciones de ácido málico como atrayente respecto a la cantidad de amoníaco para neutralizar la presión de atracción bacteriana en los capilares. Dejó constatado en las tablas de concentraciones que, buscando la disolución mínima para encontrar el umbral mínimo de irritación, y variando la temperatura de condiciones ambientales hasta 5° C, la variación de la concentración de ácido málico respecto a la respuesta umbral de irritación atrayente al capilar siempre seguía la ley de Weber-Fechner – tanto en termo bacterias (Pfeffer 1888, Keller y Segel 1971)<sup>453</sup>, como en espermias de helechos, y en mixomicetos (Pfeffer 1888; Hillen y Painter 2009).

La irritabilidad de una célula forma parte del proceso cognitivo que permite describir la percepción de un estímulo, respondiendo de forma no lineal. Principalmente es una capacidad homeostática que permite a los organismos sobrevivir y adaptarse a los cambios ambientales. Pero con esas adaptaciones conjugan una cantidad de interrelaciones sensitivas “subjetuales” del Innenwelt del organismo que responden a la ley de Weber-Fechner ante el tropismo o la taxis frente a su Umwelt. O como diría Rodolfo R. Llinás (2003) una “sensación subjetiva” o “*protoqualia*”<sup>454</sup> que ofrecen una señal eléctrica o química como una función potencial de estímulo en el momento que despunta del umbral mínimo de percepción, desencadenando una acción celular coherente. Este puede ser el origen de los qualia – comenta Rodolfo Llinás - si se produce una amplificación geométrica de la irritabilidad de millones de bacterias para establecer el cuerpo fructífero, o de miles de millones de neuronas para establecer una función coherente sincrónica de movimientos de un brazo para ofrecer la mano a un homínido de su especie. Esta amplificación geométrica cumple la ley de Weber-Fechner. “Amplificación que es ofrecida gracias a la organización de circuitos

---

<sup>452</sup> Gustav Theodor Fechner (1801 – 1887) expuso en 1860 en sus “Elemente der Psychophysik” las ideas conectivas entre la materia y la psique, desarrolladas en su mente desde 1850. Comprendió que debía de medir (obsesión existencialista de Lord Kelvin) a través de un aumento relativo de energía corporal, el correspondiente aumento de intensidad mental. Como los trabajos fueron comprobaciones de las teorías efectuadas en 1825 y 1834 por Ernst Heinrich Weber (1795 – 1878) para el estudio de mediciones de pérdida de audición conductiva y también sobre el tacto, editado en “Die Lehre vom Tastsinn und Gemeingefühl” en 1946, Fechner quiso mantener con el nombre de “ley de Weber” aunque el propio Weber no la formuló nunca, ampliándolo también a la detección de pesos.

<sup>453</sup> Los trabajos de Pfeffer sobre la Ley de Weber-Fecher en la quimiotaxis bacteriana queda verificado por C. Weibul en su trabajo “In Bacteria”. Vol 1. I. C. Gunsalus & R. Y. Stanier, eds. pp. 153. Pero donde queda verdaderamente demostrado es en Keller y Segel (1971).

<sup>454</sup> “Los ‘qualia’ humanos son la amplificación geométrica de una irritabilidad unicelular que aún no comprendemos bien (...) Sobre su origen unicelular es poco lo que puede decirse hoy por hoy, pero esta ignorancia no es una razón definitiva para pensar que son fenómenos inexplicables científicamente porque tenemos evidencia contundente de que los qualia están atados a la actividad electromagnética del cerebro y de que son ‘solubles en anestesia’.” Llinás, R. R. (2001) *I of the Vortex, From Neurons to Self*. MIT Press.

especializados en funciones sensoriales” (Llinás 2003). Dichos circuitos sensoriales son precisamente los Funktionkreises o circuitos funcionales de Uexküll (1920) que permiten estructurarse de forma multicompleja en función de las especializaciones transductoras de señales, y la autoinducción de señales para la transferencia de información (Castro 2009). Una de las cosas que se establece en estructura de la fórmula de Weber-Fechner es la progresión geométrica, basada en el número e, base de los logaritmos naturales, como hemos visto anteriormente en los estudios de Pfeffer implica que los qualia se distribuyan como armónicos.

Este es el nexo de unión entre la percepción fenomenológica de los gradientes de intensidad de un estímulo y la sensación producida por ella. No sólo sería la prueba de que se pueden medir o cuantificar los procesos cognitivos, así como el grado de percepción del estímulo. También en el aspecto epistemológico establecería un nexo de unión entre un estudio biológico experimental de un fenómeno, cuya descripción está fundamentada por los “materiales” físico-químicos en los que están basados, y la descripción fenomenológica de un proceso emergente gracias a la identificación de sus partes actuantes o de sus componentes “materiales” interactuantes, que requiere de una energía colateral – consumo de entropía negativa y de información latente (Ben-Jacob, Shapira y Tauber 2006) – y también de circuitos funcionales de determinación, cuyos efectos se codifican de los sucesos que los precedieron (de forma normativa) revelando de esta forma una jerarquía de tipos lógicos propios del fenómeno que fundamentan la veracidad de su existencia.

Lo que en su momento ha sido una propuesta de estudio para investigar (Castro 2009; 2011) en la actualidad ya ha habido una primera investigación realizada por Yoshihisa Mori y Asami Koaze, del Departamento de ciencias del Animal, Teikyo University of Science and Technology, en Yatsusawa, Uenohara. No tan sólo han hecho una iniciación al estudio de las leyes de Weber-Fechner para organismos sin sistema nervioso, también lo han desarrollado para el *Physarum polycephalum*, todo un héroe en Japón.

La propuesta de Mori y Koaze (2013) es la siguiente: “El plasmodio *Physarum polycephalum* tiene la capacidad de encontrar la ruta más corta entre dos puntos en un laberinto. Para encontrar la ruta más corta entre dos puntos, la detección de la diferencia de longitudes se puede hacer de dos aspectos: la diferencia absoluta entre las longitudes o la relación de ellos. Se encontró que la relación de dos longitudes, en lugar de la diferencia absoluta entre las dos longitudes, era importante en la discriminación de la diferencia en las dos longitudes por el *Physarum polycephalum*. Este hallazgo indica que un organismo ameboide detecta diferencias en la intensidad del estímulo como si se ve limitada por la ley de Weber, lo que sugiere que la ley de Weber no depende de la presencia de un sistema neural y se utiliza ampliamente incluso en Amoebozoa”.<sup>455</sup>

La propuesta del autor de este trabajo de investigación que concluye está enfocado en el estudio de los umbrales mínimos de percepción de las puntas de conducción de los

---

<sup>455</sup> Mori, Y., Koaze, A. (2013) Cognition of different length by *Physarum polycephalum*. Weber's law in an amoeboid organism

plasmodios, a través de la aplicación de diferentes tipos de anestésicos, tal como William Seifriz (1941, 1945), y Seifriz y Epstein (1941) había investigado, sabiendo actualmente que el efecto de la anestesia no depende estrictamente de la bioquímica de determinados componentes no comunes entre los distintos tipos de anestesia, sino de la estructura microtubular del citoplasma que se ve afectado por la aplicación (Hagan, Hameroff, y Tuszynski 2002). En este efecto de la anestesia puede encontrarse el principio de percatación y sintiencia que marcaría una pauta de estudios biosemióticos de gran calado transdisciplinar que conectaría con lo que Rodolfo Llinas (2001) denomina “proto-qualia”. Este es el “fin” de un nuevo comienzo...

## Conclusiones finales

Mi propuesta es que podemos desarrollar un discurso no sólo filosófico, sino también biosemiótico, y por lo tanto transdisciplinar, de las contribuciones existentes para fundamentar un cognitismo mínimo en organismos que carecen de sistema nervioso para desarrollarlo. En el desarrollo del estudio de los principios mínimos cognitivos asociados específicamente al mixomiceto plasmodio auténtico *Physarum polycephalum*<sup>456</sup> he desarrollado un cuadro donde hago presente todos y cada uno de los puntos sobre dichos principios desde las perspectivas de Müller, di Primio y Lengeler (2001); de Lyon (2006a); de Bateson (1979) y de Maturana (1970) y que sintetizo en cinco las condiciones de posibilidad de determinación de un principio de cognitismo mínimo:

1. La capacidad de los organismos de discernir un entorno hostil del adecuado para la supervivencia. (Criterios cognitivos<sup>457</sup> de selectividad, control, interacción y valencia).
2. La capacidad de comunicación célula a célula. Dicha comunicación no sólo transmiten información de las condiciones del entorno para fagocitar o huir, o de adhesión para formar el cuerpo fructífero, sino también la capacidad de comunicar sobre la comunicación, sobre la normatividad comunicativa, y por tanto la capacidad de establecer una “*metacomunicación*” o tal como Bateson designa una “jerarquía de prototipos lógicos” que ofrece la capacidad de aprender acerca del contexto. (Criterios de normatividad, continuidad, memoria, control, interacción, selectividad e interdependencia).
3. La capacidad de motilidad autónoma y su integración a una movilización colectiva cooperativa a través de movimientos oscilatorios acoplados. (Criterios cognitivos de interacción, interdependencia, reducción de la aleatoriedad, control y continuidad).

---

<sup>456</sup> En general, estensible a todos los mixomicetos estudiados en este Trabajo (*Physarum polycephalum* y *Dictyostelium discoideum*) como en proteobacterias Gramnegativas también señaladas (mixobacterias *E. Coli*)

<sup>457</sup> Criterios cognitivos según Pamela Lyon.

4. La reacción anticipativa ante señales fotolumínicas periódicas. (Criterios cognitivos de control, interacción, anticipación, memoria, valencia y reducción de la aleatoriedad).
5. La determinación de umbrales de densidad de población a través de la tensegridad estructural del citoplasma y de la percepción háptica (haptotaxis, elasticotaxis) entre células contiguas o adyacentes. (Criterios cognitivos de valencia, interdependencia, control, memoria, selectividad, normatividad y continuidad).

Todas ellas forman parte de la autorregulación y la autoorganización de los organismos de cara a la “enacción autopoietica” que confiere el significado de cognición en tanto que se trata de “círculos funcionales” mínimos, tal como Uexküll describió como fundamento a una teoría de la significación en los organismos vivos; aunque también es como Bateson determina en uno de sus criterios fundamentales para el proceso cognitivo – el cuarto criterio concretamente.

Hemos visto que la determinación de quórum, o autoinducción, es el responsable de un comportamiento social coordinado, y junto con la sincronización de pulsos oscilatorios permiten el control de las densidades de población al igual que confieren la que se denomina una memoria química de corto alcance.

Tanto en los mixomicetos y las bacterias, como organismos primitivos aún permanentes en la historia del origen y de la evolución biológica, se han mantenido tanto la morfología como su fisiología prácticamente intacta (Baluška y Mancuso, 2009). De ellos hemos aprendido que, aunque los mixomicetos sean eucariotas y las bacterias procariotas, ambas mantienen principios de autoorganización y de desarrollo autopoietico semejantes. Si Maturana estaba en lo cierto en la identificación entre autopoiesis y cognición (Maturana 1970) – aunque dicha identificación no sea tautológica como observa Luisi – entonces los fundamentos bioquímicos y biofísicos que subyacen en la dinámica vital de desarrollo de los mismos, provocan una concepción “teleo-mecanicista” o “vitalismo-materialista” – según la acertada concepción de Timothy Lenoir (1989) – de cognición.

Para finalizar, hemos podido comprobar que un aspecto trascendente de los mixomicetos es la relación del flujo de corriente eléctrica y su polarización asociada a los filamentos de actina-miosina y microtúbulos que, a su vez coordinan el flujo de corriente (streaming) del plasmodio y sus oscilaciones para la “*motiligencia*”. Su papel de red de transducción, transmisión y estructuración de datos corrientes dentro del plasmodio está ahora en estudio (Mayne, Adamatzky, y Jones 2015)<sup>458</sup> Dichas redes se generan a través de todo el tubo protoplasmático del *Physarum polycephalum*, generando una extensa interconexión de triangulaciones de Delaunay, Voronoy y árboles de Steiner que hemos visto anteriormente que genera el plasmodio en su motiligencia.

---

<sup>458</sup> Mayne, R., Adamatzky, A., Jones, J. (2015) *On the role of the plasmodial cytoskeleton in facilitating intelligent behaviour in slime mould Physarum polycephalum*. Communicative & Integrative Biology. Vol. 8, Nº 4: E1059007

La conexión morfológica de la estructura de los filamentos de actina-miosina y de los microtúbulos que generan su estabilidad dinámica en sus cambios de árboles y triangulaciones posibles, son las mismas que se dinamizan en el desplazamiento de los plasmodios. O como dice el principio de correspondencia de la filosofía hermética<sup>459</sup>: “lo que hay adentro (en el citoplasma) está afuera (en el trayecto de su desplazamiento), lo que hay arriba (las redes complejas de interconexión microtubular de las neuronas) es lo que hay abajo (en el complejo citoplasmático del mixomiceto<sup>460</sup>)”.

A medida que el plasmodio se mueve hacia adelante, su aparato sensorial y citoesqueleto se re-forma automáticamente para adaptarse a la nueva forma del organismo. Esto pone de relieve cómo la estructura de los flujos de datos de plasmodios se acopla de forma dinámica a su entorno. Hasta cierto punto, el plasmodio también interactúa recíprocamente con la morfología de su entorno, por ejemplo, siguiendo gradientes de nutrientes de fuentes de alimentos antes de modificar como se consume el alimento.

Como podemos comprobar los fundamentos de un cognitismo mínimo en sistemas inteligentes no es una exclusividad de los organismos vivos superiores. Más bien comparten estos fundamentos todos los seres unicelulares animal y no animal, como los mixomicetos, las bacterias, las plantas e incluso las células endoteliales de los vasos sanguíneos, neuronas y células glia. A través de dichos fundamentos podemos establecer el conato entre el Umwelt y el Innenwelt del que Uexküll nos hablaba hace ya un siglo como “tonus”<sup>461</sup> (Uexküll 1909) y que conjuga como un “mínimo cognitivo” cuando los tonos son reconocidos entre semejantes, aparte de ser un condicionante biosemiótico fundamental para una posible fenomenología biológica o “biofenomenología” en los próximos años.

---

<sup>459</sup> Kitab SIRR al-Khaliqa wa Sanat al-Tabia (c. 650 d.C.), Kitab SIRR al-Asar (c. 800 d.C.), Kitab Ustūqus al-Uss al-Thani (siglo XII) y Secretum Secretorum (c. 1140)

<sup>460</sup> Con la no menos interesante relación de isotipos de tubulinas entre el *Physarum polycephalum* y diferentes mamíferos, incluyendo el ser humano. “These experiments suggest an analogy between the  $\beta$ -tubulin of brain and the  $\alpha$ -tubulin of *Physarum myxamoebae*”. Clayton, L. et al. (1980) *A comparison of tubulins from mammalian brain and Physarum polycephalum*. FEBS Letters. Volume 115, number 2, pp. 301-306.

<sup>461</sup> Uexküll utiliza el término "tonus" a la estimulación que se envía a los órganos efectores desde el Innenwelt. “Tonusthaltheorem” explica que el tiempo y la capacidad interactiva del operador que asocia a cada sistema vivo su Umwelt viene ofrecida como flujos.

**TABLA DE RELACIONES DE PRINCIPIOS MÍNIMOS COGNITIVOS**

<b>Principios Mínimos Cognitivos</b>		
<b>Müller, di Primio y Lengeler (2001)</b>	<b>Conducta Physarum polycephalum</b>	<b>Página Tesis</b>
Vías modificables de estímulo-respuesta [base de todos los comportamientos]	Retracción para minimizar distancia en laberinto (Nakagaki, Yamada y Toth 2000)	285-288
	ATP en la punta del plasmodio superviene a la capacidad locomotora del mismo (Takagi, Nishiura, Nakagaki y Ueda 2006)	132
Búsqueda selectiva	Normas de valoración comparativas para la toma de decisiones de alimentos (Latty, T., Beekman, M. 2011a)	
	Velocidad precisa para la toma de decisiones (Latty, T., Beekman, M. (2011b)	
Percepción	De las barreras del laberinto (Nakagaki, Yamada y Toth 2000)	285-288
	De las fuentes de alimentación (Nakagaki, Yamada y Toth 2000)	285-288
Memoria	Anticipación y memoria de pulsos periódicos (Saigusa, Tero, Nakagaki y Kuramoto 2008)	296-304
	Uso de su rastro para memoria espacial (Reid, Latty, Dussutour y Beekman 2012).	
Formación de expectativas de reacción [sobre la privación repentina de alimentos]	Modelo de R-D para los patrones de oscilación del streaming (Yamada, Nakagaki, Baker y Maini 2004)	126
	Distribución de los nutrientes (Dussutour, Latty, Beekman y Simpson 2011)	
La detección de la identidad	Detección de los cambios de ritmos entre partes separadas para tomar caminos (Reid, Latty, Dussutour y Beekman 2012).	
Escrutinio [en búsqueda selectiva]	Mínimo trayecto (Nakagaki, Yamada y Toth 2000)	285-288
	Toma de decisión (Takagi, Nishiura, Nakagaki, Ueda, Ueda 2006)	239
Adaptación	Cambios morfodinámicos que dependen del ambiente para la motilidad (Takamatsu, Kagawa, Ito, Okamoto, Yokotani, Gomi, Hirai, Endo, Arafune, Matsumoto, Watanabe, Tero y Nakagaki 2009)	
Habitación [creación de hábitos]	Uso de su rastro para memoria espacial (Reid, Latty, Dussutour y Beekman 2012).	
Aprendizaje	Resolución del laberinto (Nakagaki, Yamada y Toth 2000)	285-288
	Uso de su rastro para memoria espacial (Reid, Latty, Dussutour y Beekman 2012).	
Cooperación	Producción de “cuerpos fructíferos” (Seifriz 1931; 1936; 1938)	268
	Detección de los cambios de ritmos entre partes separadas para tomar caminos (Reid, Latty, Dussutour y Beekman 2012).	
	Violación del principio de regularidad a tomar decisiones colectivas de alimentación (Latty y	

	Beekam 2011a)	
Reconfigurabilidad del cuerpo [sintetizando una situación-dependiente o la autodestrucción de efectores y sensores; para evitar hambre]	De plasmodio a esclerocio (Seifriz 1939; Gehenio 1944; Jump 1954)	239, 270
Flexibilidad [tenseguridad]	Ueda, M., Kuroiwa, T., Matsunaga, S. and Ogihara, S. (2000): Microtubule-dependent migration of the cell nucleus toward a future leading edge in amoebae of Physarum polycephalum. Protoplasma, 211:172-182.	

<b>Principios Mínimos Cognitivos</b>		
<b>Pamela Lyon (2006)</b>	<b>Conducta Physarum polycephalum</b>	<b>Página Tesis</b>
Continuidad	Comunicación intracelular: Modelo de R-D (Yamada, Nakagaki, Baker y Maini 2004)	126
Control	Ueda, M., Kuroiwa, T., Matsunaga, S. and Ogihara, S. (2000): Microtubule-dependent migration of the cell nucleus toward a future leading edge in amoebae of Physarum polycephalum. Protoplasma, 211:172-182.	
	Distribución de los nutrientes (Dussutour, Latty, Beekman y Simpson 2011)	
Interacción	Irracionalidad de toma de decisiones alimenticias (Latty y Beekman 2011a)	
Normatividad	Normas de valoración comparativas para la toma de decisiones de alimentos (Latty, T., Beekman, M. 2011a)	
	Velocidad precisa para la toma de decisiones (Latty, T., Beekman, M. (2011b)	
Memoria	Anticipación y memoria de pulsos periódicos (Saigusa, Tero, Nakagaki y Kuramoto 2008)	296
	Uso de su rastro para memoria espacial (Reid, Latty, Dussutour y Beekman 2012).	
Selectividad	Toma de decisión (Takagi, Nishiura, Nakagaki, Ueda, Ueda 2006)	239
Valencia	Ueda, M., Kuroiwa, T., Matsunaga, S. and Ogihara, S. (2000): Microtubule-dependent migration of the cell nucleus toward a future leading edge in amoebae of Physarum polycephalum. Protoplasma, 211:172-182.	
Anticipación	Anticipación y memoria de pulsos periódicos (Saigusa, Tero, Nakagaki y Kuramoto 2008)	
	Uso de su rastro para memoria espacial (Reid, Latty, Dussutour y Beekman 2012).	
Reducción de la aleatoriedad	Modelo de R-D para los patrones de oscilación del streaming (Yamada, Nakagaki, Baker y Maini 2004)	126
	Uso de su rastro para memoria espacial (Reid, Latty, Dussutour y Beekman 2012).	
Interdependencia	De plasmodio a esclerocio (Seifriz 1939; Gehenio 1944; Jump 1954)	239, 270

<b>Procesos mentales / cognitivos</b>		
<b>Gregory Bateson (1979)</b>	<b>Conducta Physarum polycephalum</b>	<b>Página Tesis</b>
Una mente es un agregado de partes o componentes interactuantes	Uso de su rastro para memoria espacial (Reid, Latty, Dussutour y Beekman 2012).	
	Cooperatividad colectiva en toma de decisiones alimenticias (Latty y Beekman 2011a)	
La interacción de las partes de la mente se desencadena por la diferencia	Uso de su rastro para memoria espacial (Reid, Latty, Dussutour y Beekman 2012).	
	Cooperatividad colectiva en toma de decisiones alimenticias (Latty y Beekman 2011a)	
El proceso mental requiere de una energía colateral	Distribución de los nutrientes (Dussutour, Latty, Beekman y Simpson 2011)	
El proceso mental requiere de procesos circulares (o más complejas) de determinación	Modelo de R-D para los patrones de oscilación del streaming (Yamada, Nakagaki, Baker y Maini 2004)	126
En el proceso mental, los efectos de la diferencia deben de ser vistos como transformaciones (es decir, versiones codificadas) de sucesos que los han precedido	Comunicación interna: modelo R-D (Yamada, Nakagaki, Baker y Maini 2004)	126
	Toma de decisión (Takagi, Nishiura, Nakagaki, Ueda, Ueda 2006)	239
	Normas de valoración comparativas para la toma de decisiones de alimentos (Latty, T., Beekman, M. 2011a)	
	Velocidad precisa para la toma de decisiones (Latty, T., Beekman, M. (2011b)	
La descripción y clasificación de estos procesos de transformación revelan una jerarquía de prototipos lógicos inmanentes en los fenómenos	Normas de valoración comparativas para la toma de decisiones de alimentos y violación del “principio de Concorcet” (Latty, T., Beekman, M. 2011a)	
	Velocidad precisa para la toma de decisiones (Latty, T., Beekman, M. (2011b)	

<b>Procesos cognitivos / Autopoiesis</b>		
<b>Humberto Maturana (1970)</b>	<b>Conducta Physarum polycephalum</b>	<b>Página Tesis</b>
Una red autopoietica es una red de componentes interactuantes	Irracionalidad interdependiente del comportamiento colectivo para la toma de decisiones alimenticias (Latty y Beekman 2011a)	
	Velocidades precisas y la toma de decisiones Latty y Beekman (2011b)	
	Distribución de los nutrientes (Dussutour, Latty, Beekman y Simpson 2011)	
La respuesta de un organismo requiere de acoplamiento estructural y de patrones no lineales	Toma de decisión (Takagi, Nishiura, Nakagaki, Ueda, Ueda 2006)	239
La caracterización de un sistema vivo, en término de patrones no lineales infiere autopoiesis. La causalidad no lineal generan estructuras disipativas.	Modelo de R-D para los patrones de oscilación del streaming (Yamada, Nakagaki, Baker y Maini 2004)	126

## Bibliografía

Achenbach, F., Naib-Majani, W., Wohlfarth-Bottermann, K. E. (1979) *Plasmalemma invaginations of physarum dependent on the nutritional content of the plasmodial environment*. Journal of Cell Science, Vol. 36, pp. 355-359.

Adamatzky, A. (2007) *Physarum machines encapsulating reaction–diffusion to compute spanning tree*. Naturwissenschaften Vol. 94, pp. 975–980.

Adamatzky, A (2009a) *From reaction-diffusion to Physarum computing*. Natural Computing. September 2009, Volume 8, Issue 3, pp. 431-447

Adamatzky, A. (2009b) *If BZ medium did spanning trees these would be the same trees as Physarum built*. Physics Letters A. N° 373, pp.952–956

Adamatzky, A. (2009c) *Developing Proximity Graphs by Physarum polycephalum: Does the Plasmodio Follow the Toussaint Hierarchy?* Parallel Processing Letters. Vol. 19, N° 1, pp. 105-127.

Adamatzky, A. (2010a) *Physarum boats: if plasmodio sailed it would never leave a port*. Applied Bionics and Biomechanics Vol.7, pp. 31–39.

Adamatzky, A. (2010b) *Physarum Machines: Computers from Slime Mould*. World Scientific Series on Nonlinear Science, Series A. Vol. 74. World Scientific Pub Co Inc.

Adamatzky, A (2013a) *Physarum wires: Self-growing self-repairing smart wires made from slime mould*. <http://arxiv.org/format/1309.3583v1>

Adamatzky, A. (2013b) *Slime mould tactile sensor*. Sensors and Actuators B: Chemical Vol. 188, pp. 38–44. <http://arxiv.org/abs/1306.0258>

Adamatzky, A. (2013c) *Towards slime mould colour sensor: Recognition of colours by Physarum polycephalum*. Organic Electronics Vol. 14. N° 12, pp. 3355-3361.

Adamatzky, A. (2014) *Slime mould electronic oscillators*. Microelectronic Engineering Vol. 124, pp. 58-65.

Adamatzky, A. (ed.) (2015) *Atlas of Physarum Computing*. World Scientific. Publishing Co. Pte. Ltd.

Adamatzky, A. (2015) *A Would-Be Nervous System Made from a Slime Mold*. Artificial Life. Winter 2015, Vol. 21, No. 1, pp. 73-91.

Adamatzky, A., Arena, P., Basile, A., Carmona-Galan, R., de Lacy Costello, B., Fortuna, L., Frasca, M. and Rodriguez-Vazquez, A. (2004) *Reaction-diffusion navigation robot control: From chemical to VLSI analogic processors*. IEEE

Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 51 (5). 926 - 938. ISSN 1057-7122.

Adamatzky, A., Jones, J. (2010) *Programmable reconfiguration of Physarum machines*. Natural Computing. Volume 9, N° 1, pp 219-237.

Adamatzky, A., Armstrong, R., Jones, J., Gunji, Y-P. (2013) On Creativity of Slime Mold.

Adamatzky, A., Chua. L. (2014) *Memristors Network*. Springer International Publishing Switzerland.

Agre, P. and Chapman, D. (1987) *PENGI: An implementation of a theory of activity*. En: Proceedings of the Sixth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-87), pages 268-272, Seattle, WA.

Ainsworth, G. C. (1976) *Introduction to the History of Mycology*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Albrecht- Bruehler, G. (2005) *A long-range attraction between aggregating 3T3 cells mediated by near-infrared light scattering*. Proceedings of the National Academy of Sciences. Vol. 102. N°. 14 5050-5055.

Albrecht-Buchler, G. (1990) *In defense of 'nonmolecular' biology*. International Review of Cytology. N° 120, pp. 191–241.

Albrecht-Buehler, G. (1977) *Daughter 3T3 Cells. Are the Mirror Images of Each Other?* Journal of Cell Biology. N° 72. pp. 595-603.

Albrecht-Buehler, G. (1980) *Autonomous movements of cytoplasmic fragments*. Proceedings of the National Academy of Sciences Vol. 77, No. 11, pp. 6639-6643

Albrecht-Buehler, G. (1981) *Does the geometric design of centrioles imply their function*. Cell Motility, 1. pp. 237-245.

Albrecht-Buehler, G. (1992) *Rudimentary form of cellular "vision"*. PNAS 89, pp. 8288-8292.

Albrecht-Buehler, G. (1998) *Altered Drug Resistance of Microtubules in Cells Exposed to Infrared Light Pulses: Are Microtubules the "Nerves" of Cells?* Cell Motility and the Cytoskeleton 40 (2). pp. 183-192.

Albrecht-Buehler, G., Zand, M. S. (1998) *Long-term observation of cultured cells by interference-reflection microscopy: Near-infrared illumination and Y-contrast image processing*. Cell Motility and the Cytoskeleton, 43 (2). pp. 94-103.

Alexandre, G., & Zhulin, I. B. (2001) *More than one way to sense chemicals*. Journal of Bacteriology. Vol. 183, pp. 4681–4686.

*Aristoteles Semitico-Latinus: Nicolaus Damascenus De plantis; five translations*. Edited and introduced by H.J. Drossaart Lulofs and E.L.J. Poortman. Amsterdam: North-Holland Publishing, 1989.

Armitage, J. P. (1992). *Bacterial motility and chemotaxis*. Science Progress, Vol. 76, pp. 451–477.

Armitage, J. P. (1999). *Bacterial tactic responses*. Advances in Microbial Physiology, Vol. 41, pp. 229–289.

Arndt, A. (1937) *Rhizopodenstudien. III. Untersuchungen über Dictyostelium mucoroides*. Wilhelm Roux 'Archiv für Entwicklungsmechanik der Organismen, 1936. Published in: Development Genes and Evolution . 1937, Volume 136, Number 5, pp. 681-744.

Artmann, S. (2009) *Basic semiosis as code-based control*. Biosemiotics, N° 2. pp. 31–38.

Artmann, S., Tsuda, S., Zauner, K-P. (2008) *Information-Theoretic Aspects of Control in a Bio-Hybrid Robot Device*. Artificial Life. Vol 11. pp. 33-40.

Balázsi, G., Oudenaarden, A v., Collins, J. J. (2011) *Cellular Decision-Making and Biological Noise: From Microbes to Mammals*. Cell. Vol. 144, N° 6, pp. 910–925.

Baldauf, S. L. (2003) *The deep roots of Eukaryotes*. Science 300, pp. 1703-1706.

Baldauf, S. L., Doolittle, W. F. (1997) *Origin and evolution of the slime molds (Mycetozoa)*. Proceedings of the National Academy Sciences. Vol. 94, pp. 12007–12012.

Baldwin, J. M. (1896) *A new factor in evolution*. The American Naturalist, Vol. 30: pp. 441—451, y pp. 536—553.

Ball, P. (2008) *Cellular memory hints at the origins of intelligence*. Nature, 451, p. 385.

Baluška, F., Mancuso, S. (2007) *Plant Neurobiology as a Paradigm Shift Not Only in the Plant Sciences*. Plant Signaling & Behavior, Vol.2, N°4, pp. 205-207.

Baluška, F., Volkmann, D., Menzel, D. (2005) *Plant synapses: actin-based domains for cell to cell communication*. Trends in Plant Science, Vol. 10 (3), pp. 106—111.

Baluška, F. Mancuso, S. (2009). Deep evolutionary origins of neurobiology: Turning the essence of ‘neural’ upside-down. Communicative & Integrative Biology. Vol. 2, N° 1, pp. 60–65.

Baluška, F., Mancuso, S. (2009) *Deep evolutionary origins of neurobiology. Glossary.* Communicative & Integrative Biology 2:1, 1-2.

Barandiaran, X. (2008) *Mental Life. A naturalized approach to the autonomy of cognitive agents.* PhD Thesis. (University of the Basque Country, Spain). Director: Alvaro Moreno. [http://xabierbarandiaran.files.wordpress.com/2010/06/barandiaran\\_-\\_2008\\_-\\_phd\\_thesis.pdf](http://xabierbarandiaran.files.wordpress.com/2010/06/barandiaran_-_2008_-_phd_thesis.pdf)

Barandiaran, X., Moreno, A. (2006) *On what makes certain dynamical systems cognitive: A minimally cognitive organization program.* Adaptive Behavior, Vol. 14(2), pp. 171–185.

Barandiaran, X., Di Paolo, E., Rohde, M. (2009) *Defining Agency. Individuality, Normativity, Asymmetry and Spatio-temporality.* Adaptive Behavior. Vol. 17, N° 4, pp. 367-386. Special Issue on Agency in Natural and Artificial Systems.

Barbieri, M. (2003) *The Organic Codes. An Introduction to Semantic Biology.* Cambridge University Press.

Barbieri, M. (2009) *Three types of semiosis.* Biosemiotics, N° 2, pp. 19–30.

Barends, T. R. et al. (2009) *Structure and mechanism of a bacterial light-regulated cyclic nucleotide phosphodiesterase.* Nature, 459 (7249), pp. 1015-8.

Bary, A. de. (1859) *Die Mycetozoen* (Zeitschrift f. wiss. Zoologie, Bd. X, 1859, and 2nd ed. Leipzig, 1864).

Bary, A. de. (1884) *Vergleichende Morphologie und Biologie der Pilze, Mycetozoen und Bacterien.* Verlag von Wilhelm Engelmann. Leipzig. En inglés: *Comparative morphology and biology of the Fungi, Mycetozoa and Bacteria.* Oxford University Press, 1887.

Bateson, G. (1979) *Mind and Nature. A necessary unity.* Dutton, N.Y. En castellano: *Espíritu y Naturaleza.* Amorrortu editores, Madrid, 2006.

Bechtel, W. (2014) *Cognitive biology: Surprising model organisms for cognitive science.* Proceedings of the 36th Annual Conference of the Cognitive Science Society. Austin, TX: Cognitive Science Society.

Beer, R. D. (1990) *Intelligence as Adaptive Behavior. An Experiment in Computational Neuroethology.* Academic Press Inc.

Beer, R. D. (1996). *Toward the evolution of dynamical neural networks for minimally cognitive behavior.* En: P. Maes, M. Mataric, J. Meyer, J. Pollack, & S. Wilson (Eds.), From Animals to Animats 4: Proceedings of the Fourth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior (pp. 421–429). Cambridge, MA: MIT Press.

Beer, R. D. (2003) *The dynamics of active categorical perception in an evolved model agent*. *Adaptive Behavior*, Vol. 1(4), pp. 209–243.

Beer, Th., Bethe, A., Uexküll J. von (1899) *Vorschläge zu einer objectivierenden Nomenklatur in der Physiologie des Nervensystems*. *Biologisches Centralblatt* N° 19. pp. 517-521.

Ben-Jacob, E., Shmueli, H., Shochet, O., Tenenbaum, A. (1992) *Adaptive self-organization during growth of bacterial colonies*. *Physica A*. Vol. 187, pp. 378–424.

Ben-Jacob, E., Shochet, O., Tenenbaum, A., Cohen, I., Czieok, A., Vicsek, V. (1994) *Generic modeling of cooperative growth patterns in bacterial colonies*. *Nature*. Vol. 368, pp. 46–49.

Ben-Jacob, E., Becker, I., Shapira, Y., Levine, H. (2004) *Bacterial linguistic communication and social intelligence*. *Trends in Microbiology*, 12 (8) 366-372.

Berg, H. C. (2000) *Motile behavior of bacteria*. *Physics Today*, Vol. 53, p. 24.

Berkeley, M. J. (1838) *On the fructification of the pileate and clavate tribes of hymenomycetous fungi*. *Annals of Natural History*. (April) Vol. X, pp 81-101.

Bernard, C. (1865) *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*. Paris / Leipzig: J.-B. Baillière et fils / Jung-Treuttel. En castellano: *Introducción al estudio de la medicina experimental*. Barcelona: Crítica (2005).

Bhalla, U. S., Iyengar, R. (1998) *Emergent Properties of Networks of Biological Signaling Pathways*. *Science*. Vol. 283, pp. 381 – 387.

Bich, L. (2012) *L'ordine invisibile. Organizzazione, autonomia e complessità del vivente*. (PhD. Thesis). Rubbettino Editore. Pubblicazioni del Dipartimento di Scienze della Persona, Università di Bergamo.

Bich, L. (2012) *Stability, Regulation and Their Role in Minimal Living Systems*. A. Diéguez, V. Claramonte, J. Alcolea Banegas, G. Caponi, A. Etxeberria, P. Lorenzano, A. Marcos, J. Martínez Contreras, A. Rosas (eds.), I Congreso de la Asociación Iberoamericana de Filosofía de la Biología (AIFBI), Universitat de Valelcia, pp. 343-350.

Bich L, Damiano L (2012) *On the emergence of biology from chemistry: a discontinuist perspective from the point of view of stability and regulation*. *Orig Life Evol Biosph* Vol. 42, N° 5, pp.475–482.

Bich, L., Moreno, A. (2013) *Autonomía biológica y las raíces de la cognición. El rol de la regulación en la emergencia de un mundo endógenamente generado*. En: P. Razeto y R. Ramos (eds) *Autopoiesis: Un Concepto Vilo*. Editorial Universitas, Nueva Civilización. Santiago de Chile. pp. 75-95.

Bich, L., Mossio, M., Ruiz-Mirazo, K., Moreno, A. (2015) *Biological regulation: controlling the system from within*. *Biology & Philosophy*, Vol. 30, pp 1-29.

Bich L, Moreno A (2015) *The role of regulation in the origin and synthetic modeling of minimal cognition*. *BioSystems*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystems.2015.08.002>

Binet, A. (1880) *The psychic life of micro-organisms. A study in experimental psychology*. Traducción de Thomas J McCormack. Chicago, Open Court Publishing Company (1910)

Bitboll, M., & Luigi, P. L. (2004). *Autopoiesis with or without cognition: Defining life at its edge*. *Journal of the Royal Society Interface*, N°1, pp. 99–107.

Boada, I. (ed.) (2004) *La filosofia intercultural de Raimon Panikkar*. Editorial Pòrtic. Col. Temes Contemporanis. Barcelona.

Bonner, J. T. (1949) *The demonstration of acrasin in the later stages of the development of the slime mold Dictyostelium discoideum*. *Journal of Experimental Zoology*, Volume 110, Issue 2, pp. 259–279.

Bonner, J. T. (1988) *The Evolution of Complexity*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Bonner, J. T. (1998) *The Origins of Multicellularity*. *Integrative Biology*. pp. 27–36.

Bonner, J. T. (2000) *First signals. The evolution of multicellular development*. Princeton University Press.

Bonner, J. T. (2002) *Lives of a biologist: adventures in a century of extraordinary science*. Harvard University Press.

Bonner, J. T. (2010) *Brainless behavior: A myxomycete chooses a balanced diet*. *Proceedings of National Academic of Sciences*, Vol. 107, No. 12, pp. 5267-5268.

Bonner, J. T., Savage, L. J. (1947) *Evidence for the formation of cell aggregates by chemotaxis in the development of the slime mold Dictyostelium discoideum*. *Journal of Experimental Zoology*, Volume 106, Issue 1, pp. 1–26.

Borshe, R., Göttlich, S., Klar, A., Schillen, P. (2014) *The Scalar Keller-Segel Model on Network*. *Mathematical Models & Methods in Applied Sciences*. Vol. 24, N°2. 221.

Bourret, R. B., Charon, N. W., Stock, A. M., & West, A. H. (2002). *Bright lights, abundant operons-fluorescence and genomic technologies advance studies of bacterial locomotion and signal transduction*. *Journal of Bacteriology*, Vol.184, pp. 1–17.

Boyd, A., Simon, M. (1982) *Bacterial chemotaxis*. Annual Review of Physiology, Volo.44, pp. 501–517.

Braitenberg, V. (1984). *Vehicles: Experiments in Synthetic Psychology*. Cambridge, Massachussets: MIT Press.

Brangwynne, C. P., MacKintosh, F. C., Kumar, S., Geisse, N. A., Talbot, J., Mahadevan, L., Parker, K. K., Ingber, D. E., Weitz, D. A. (2006) *Microtubules can bear enhanced compressive loads in living cells because of lateral reinforcement*. Journal of Cell Biology. Vol. 173,Nº 5, pp. 733-741.

Brefeld, O. (1869) *Dictyostelium mucoroides. Ein neuer Organismus aus der Verwandtschaft der Myxomyceten*. Abhandlungen der Senckenbergischen Naturforschenden Gesellschaft Frankfurt. Vol 7, pp. 85-107.

Brefeld, O. (1884) *Polysphondylium violaceum und Dictyostelium mucoroides nebst Bemerkungen zur Systematik der Schleimpilze*. Untersuchungen aus dem Gesamtgebiet der Mykologie. Vol. 6, pp. 1-34.

Brier, S. (2001) *Cybersemiotics and Umweltlehre*. Semiotica. Vol. 134 (1/4).pp 779-814.

Brier, S. (2008) *Bateson and Peirce on the Pattern that Connects and the Sacred*. En Hoffmeyer, J. (ed.) A Legacy for Living Systems. Gregory Bateson as Precursor to Biosemiotics. Springer.

Brooks, R. A. (1986) *Archieving Artificial Intelligence throught Building Robots*. AI Memo 889, MIT Artificial Intelligence Laboratory, mayo 1986.

Brooks, R. A. (1990) *Elephants Don't Play Chess*. Robotics and Autonomous Systems (6), pp. 3–15.

Brooks, R. A. (1991a) *Intelligence without Representation*. Artificial Intelligence Journal (47), pp. 139–159.

Brooks, R. A. (1991b) *Intelligence without Reason*. A.I. Memo No. 1293, Prepared for Computers and Thought, IJCAI-9.

Brooks, R. A. (1999). *Cambrian Intelligence: The Early History of the New AI*. Cambridge, MIT Press.

Burr, H. S., Seifriz, W. (1955) *Response of the Slime Mold to Electric Stimulus*. Science, New Series, Vol. 122, No. 3178 (Nov. 25, 1955), pp. 1020-1021.

Capra, F. (1996) *The Web of Life*. Anchor Books, N.Y. En castellano: *La trama de la vida. Una nueva perspectiva de los sistemas vivos*. Anagrama. Col. Argumentos. Barcelona, 1998.

- Castellanos, N., Lombardo, D., Makarov, V. A., Velarde, M. G., Arena, P. (2008) *Quimiotaxis, Infotaxis y Memotaxis: estrategias de exploración y supervivencia*. Revista Española de Física, Vol. 22, Nº 3, pp. 42-46.
- Castro, O. (2009) *Jakob von Uexkiüll: El concepto de Umwelt y el origen de la biosemiótica*. Trabajo de investigación para la obtención del DEA. Departament de Filosofia, Universitat Autònoma de Barcelona.
- Castro, O. (2011) *La biosemiótica y la biología cognitiva en organismos sin sistema nervioso*. Ludus Vitalis, vol. XIX, num. 36, 2011, pp. 47-84.
- Chalmers, D. J. (1996) *The Conscious Mind. In Search of a Fundamental Theory*. Oxford University Press. En español: *La Mente Consciente. En Busca de una Teoría Fundamental*. Editorial Gedisa, Barcelona, 1999.
- Chalmers, D. J (2008), *Foreword to Andy Clark's Supersizing the Mind*. En Clark (2008b), pp.ix-xvi.
- Chapman, D., Agre, P. (1986) *Abstract reasoning as emergent from concrete activity*. En Georgeff, M. P. and Lansky, A. L., editores, *Reasoning About Actions & Plans - Proceedings of the 1986 Workshop*, pages 411-424. Morgan Kaufmann Publishers: San Mateo, CA.
- Chatton, E. (1937) *Titres et travaux scientifiques (1906–1937)*. Sète, Francia. E. Sottano.
- Chebanov, S. V. (1998) *The Role of Hermeneutics in Biology*. En: Peter Koslowski (Ed.): *Sociobiology and Bioeconomics. The Theory of Evolution in Biological and Economic Theory*, Berlin, Heidelberg, New York (Springer) 1998, pp. 141-172, Cap. 6. (3D Studies in Economic Ethics and Philosophy, vol. 20).
- Chebanov S. V. (1999) *Biohermeneutics and hermeneutics of biology*. *Semiotica* Nº 127-1/4. pp. 215-226.
- Chebanov, S. V. (2001) *Umwelt as Live World of Living being*. *Semiotica* 134-1/4. pp. 169-184.
- Chernyak, L., Tauber, A.I. (1991) *The dialectical self: Immunology's contribution*. En: Tauber, A.I. (ed.) *Organism and the origins of self*. Dordrecht: Kluwer, S.
- Chua, L. O. (1971) *Memristor-The missing circuit element*. *IEEE Transactions on Circuit Theory*, Vol. 18, Nº. 5, pp. 507-519.
- Clark, A. (1989) *Microcognition: Philosophy, Cognitive Science, and Parallel Distributed Processing*. Cambridge, Mass.: MIT Press.

- Clark, A. (1997) *Being there: Putting brain, body, and world together again*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Clark, A. (1999) *Embodiment: From Fish to Fantasy. An Embodied Cognitive Science?* Trends in Cognitive Sciences Vol. 3, Nº 9, pp. 345-351.
- Clark, A. (2008a) *Pressing the flesh: a tension in the study of the embodied, embedded mind?*. Philosophy and Phenomenological Research, 76, (1), 37-59.
- Clark, A. (2008b) *Supersizing the Mind: Embodiment, Action, and Cognitive Extension*. New York: Oxford University Press.
- Clark, A., Chalmers, D. (1998) *The extended mind*. Analysis Vol.58, Nº1, pp. 7-19.
- Clayton, L. Quinlan, R. A., Roobol, A., Pogson, C. I., Gull, K. (1980) *A comparison of tubulins from mammalian brain and Physarum polycephalum*. FEBS Letters. Volume 115, Nº 2, pp. 301-306.
- Contreras, C. (2008) *Potenciales efectivos y funciones de memoria en dispersiones coloidales. Coloides en capas planas paralelas: un modelo de control coloidal*. Tesis Doctoral. Departamento de Física, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav), México D. F.
- Cornillon, S., Gebbie, L., Benghezal, M., Nair, P., Keller, S., Wehrle-Haller, B., Charette, S. J., Brückert, F., Letourneur, F., Cosson, P. (2006) *An adhesion molecule in free-living Dictyostelium amoebae with integrin  $\beta$  features*. EMBO Reports Vol. 7 (6). pp. 617-621.
- Dale, K., Husbands, P. (2010) *The Evolution of Reaction-Diffusion Controllers for Minimally Cognitive Agents*. A Life. Nº 16. pp. 1–19. MIT.
- Darwin, C. (1869) *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life* (5th ed.) London: John Murray.
- de Guzmán, M. (2002) *Tensegridad. De la escultura a la célula*. Ars Medica. Revista de Humanidades Nº 2, pp. 166-176.
- Deacon, T. W. (2012) *Incomplete Nature: How Mind Emerged from Matter*. 1st ed.; Norton: New York, NY, USA. En español *Naturaleza Incompleta. Cómo la Mente Emerge de la Materia*. Tusquets Editores, Col. Metatemas Nº 127. Barcelona 2013.
- Dell, P. F. (1985) *Understanding Bateson and Maturana: Toward a Biological Foundation for The Social Sciences*. Journal of Marital and Family Therapy. Vol. 11, No. 1, pp. 1-20.

- Denton, M. J., Marshall, C. J., Legge, M. (2002) *The protein folds as Platonic forms: new support for the pre-Darwinian conception of evolution by natural law*. Journal of Theoretical Biology 219, 325–342
- Devreotes, P. N., Zigmond, S. H. (1988) *Chemotaxis in Eukaryotic Cells: A Focus on Leukocytes and Dictyostelium*. Annual Review of Cell Biology. N° 4. pp. 649-686.
- Di Paolo, E. A. (2005) *Autopoiesis, adaptivity, teleology, agency*. Phenomenology and the Cognitive Sciences, 4, 429 - 452.
- Di Paolo, E. A. (2009) *Extended Life*. Topoi, 28, 9-21.
- Di Paolo, E. A. (2010) *Extended Life*. Conference in First European Summer School on Life & Cognition. “Day 4: Extended and Embodied Cognition”. Miramar Palace, Donostia - San Sebastian.
- Di Paolo, E. A., Rohde, M., De Jaegher, H. (2010) *Horizons for the enactive mind*. En: Gapenne, O. Stewart, J. and Di Paolo E. A. (Eds) *Enaction: Toward a new paradigm for cognitive science*. MIT Press.
- di Primio, F., Müller, B. S., & Lengeler, J. W. (2000). *Minimal cognition in unicellular organisms*. In J. A. Meyer, A. Berthoz, D. Floreano, H. L. Roitblat & S. W. Wilson (Eds.), *SAB2000 Proceedings, Supplement*, (pp. 3–12), International Society for Adaptive Behavior. Honolulu: Hawaii International
- Diggins, M. A., Dove, W. (1987) *Distribution of acetylated  $\alpha$ -tubulin in Physarum polycephalum*. The Journal of Cell Biology, Volume 104, pp. 303-309.
- Dumbar, K. (1989) *Scientific reasoning strategies in a simulated molecular genetics environment*. En: 11th Annual Conference The Cognitive Science Society. August 16-19, 1989. University of Michigan Ann Arbor, Michigan. Cognitive Science Society. Psychology Press. Taylor & Francis Group. pp. 426-433.
- Durham, A. C., Ridgway, E. B. (1976) *Control of chemotaxis in Physarum polycephalum*. Journal of Cellular Biology. Vol. 69. N° 1, pp. 218-23.
- Dusenbery, D. B. (1996) *Life at Small Scale - the Behavior of Microbes*. New York: W. H. Freeman and Company.
- Dusenbery, D. B. (1998) *Fitness landscapes for effects of shape on chemotaxis and other behaviors of bacteria*. Journal of Bacteriology, Vol. 180, pp. 5978–5983.
- Dussutour, A. Latty, T., Beekman, M., Simpson, S. J. (2010) *Amoeboid organism solves complex nutritional challenges*. Proceedings of the National Academy of Sciences. Vol. 107 N° 10, pp. 4607–4611.

Edelman, G.M. (1992) *Morphoregulation*. *Developmental Dynamics*, Vol. 193, Issue 1, pp. 2-10.

Edmondson, A. C. (1987) *A Fuller Explanation: The Synergetic Geometry of R. Buckminster Fuller*. Boston: Birkhauser.

Egbert, M., Barandiaran, X., Di Paolo, E. (2010) *Behavioral Metabolism: Metabolism Based Behavior Enables New Forms of Adaptation and Evolution*. *Alife XII: Proceeding of the 12th International Conference on Artificial Life*. The MIT Press

Eigen M, Schuster, P (1978) *The Hypercycle. A Principle of Natural Self-Organisation. Part A: Emergence of the Hypercycle*. *Naturwissenschaften* Vol. 64, N° 11, pp. 541–565.

Eigen M, Schuster, P (1978) *The Hypercycle. A Principle of Natural Self-Organisation. Part B: The Abstract Hypercycle*. *Naturwissenschaften* Vol. 65, N° 1, pp. 7–41.

Eigen M, Schuster, P (1978) *The Hypercycle. A Principle of Natural Self-Organisation. Part C: The Realistic Hypercycle*. *Naturwissenschaften* Vol. 65, N° 7, pp. 341–369.

Eigen M, Schuster, P(1979) *The Hypercycle: A principle of natural self-organization*. Springer

Eigen, M. (1971) *Molecular Self-Organization and the Early Stages of Evolution*. *Quarterly Reviews of Biophysics*, 4, 2&3. pp. 149.

Eigen, M. (1971) *Selforganization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules*. *Die Naturwissenschaften*, Vol. 58, N° 10, pp. 465-523.

Emmeche, C., Køppe, S., Stjernfelt, F.(2000) *Levels, emergence, and three versions of downward causation*. En: Peter Bøgh Andersen, Claus Emmeche, Niels Ole Finnemann and Peder Voetmann Christiansen, eds. (2000): *Downward Causation. Minds, Bodies and Matter*. Århus: Aarhus University Press. pp. 13-34.

Esmoris, M. L. (2005?) *Génesis y alcance histórico de la teoría del origen trófico del conocimiento de Ramón Turró*. Extraído de: *Significado y alcance gnoseológicos de la teoría bio-genética del conocimiento de Ramon Turró*. Trabajo de Investigación para la obtención del DEA en el Doctorado de Filosofía de la Universidad Complutense de Madrid.

[http://www.redjif.org/red//index2.php?option=com\\_resource&task=download&no\\_html=1&file=4820](http://www.redjif.org/red//index2.php?option=com_resource&task=download&no_html=1&file=4820)

Falke, J. J., Bass, R. B., Butler, S. L., Chervitz, S. A., Danielson, M. A. (1997). *The two component signaling pathway of bacterial chemotaxis: A molecular view of signal transduction by receptors, kinases, and adaptation*. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, Vol. 13, pp. 457–512.

- Favareau, D., Cobley, P., Kull, K. (2012) *A More Developed Sign. Interpreting the Work of Jesper Hoffmeyer*. Tartu Semiotics Library 10. Tartu University Press.
- Feest, A. (1987) *The quantitative ecology of soil mycetozoa*. En: Corliss, J.O., Patterson, D. J. (eds.) *Progress in Protistology*. Cap. II, pp. 331–361.
- Fiore-Donno, A-M., Berney, C., Pawlowski, J., Baldauf, S. L. (2005) *Higher-Order Phylogeny of Plasmodial Slime Molds (Myxogastria) Based on Elongation Factor 1-A and Small Subunit rRNA Gene Sequences*. *Journal of Eukaryotic Microbiology*. Vol. 52 (3), pp. 201-210.
- Fisher, M. J., Paton, R. C., Matsuno, K. (1999) *Intracellular signalling proteins as 'smart' agents in parallel distributed processes*. *BioSystems* 50. pp. 159–171.
- FitzHugh R. (1955) *Mathematical models of threshold phenomena in the nerve membrane*. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, N° 17. pp. 257—278.
- FitzHugh R. (1961) *Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane*. *Biophysical Journal*. N° 1, pp. 445-466.
- FitzHugh R. (1968) *Motion picture of nerve impulse propagation using computer animation*. *Journal of Applied Physiology*, N° 25. pp. 628-630.
- FitzHugh R. (1969) *Mathematical models of excitation and propagation in nerve*. En H.P. Schwan, ed. *Biological Engineering*, McGraw-Hill Book Co., N.Y. Cap. 1, pp. 1-85.
- Fleischer, M., Wohlfarth-Bottermann, K. E., (1975) *Correlations between tension force generation, fibrillogenesis and ultrastructure of cytoplasmic actomyosin during isometric and isotonic contractions of protoplasmic strands*. *Cytobiologie* Vol. 10, pp. 339-365
- Florkin, M. (1974) *Concepts of molecular biosemiotics and of molecular evolution*. En: *Comprehensive Biochemistry*, 29 A. pp. 1–124.
- Freeman, W. J. (2007) *Indirect biological measures of consciousness from field studies of brains as dynamical systems*. *Neural Networks*, 20, pp. 1021–1031
- Friesen, J. G. (2005) *Individuality Structures and Enkapsis: Individuation from Totality in Dooyeweerd and German Idealism*.  
<http://www.members.shaw.ca/hermandooyeweerd/Enkapsis.html>
- Fuentes, J. B. (2010) *La Teoría del Origen Trófico del Conocimiento de Ramón Turró: Un Ensayo sobre su Trasfondo Histórico-Filosófico y sus Posibilidades de Desarrollo Teórico en el Sentido de una Concepción (Neo)Aristotélica de la Vida*. *Psychologia Latina*. Vol. 1, pp. 27-69.

- Fuller, R. B. (1975) *Synergetics. Explorations in the Geometry of Thinking*.(E. J. Applewhite collaboration). Macmillan Publishing Co. Inc. New York.
- Fuller, R. B. (1975) *Synergetics: Explorations in the Geometry of Thinking*. New York: MacMillan Publishing Co., Inc.
- Fuqua, C., Glazier, J., Brun, Y., Alber, M. (2004) *Proceedings of Biocomplexity VI: Complex behavior in unicellular organisms*. Biofilms, Vol. 1(4).
- Gale, E., de Lacy Costello, B., Adamatzky, A. (2014) *Slime Mould Memristor*. BioNanoScience. .DOI 10.1007/s12668-014-0156-3. <http://arxiv.org/pdf/1306.3414.pdf>
- Gale, E., de Lacy Costello, B., Adamatzky, A. (2014) *Erratum to: Slime Mould Memristor*. BioNanoScience. .DOI 10.1007/s12668-014-0160-7.
- Gale, E., Iqbal, A., Davey, J., Gater, D. (2015) *Neural Net to Neuronal Network Memristor Interconnects*. DOI: 10.1007/978-3-319-16844-9\_8
- Gánti, T. (2002) *On the early evolutionary origin of biological periodicity*. Cell Biology International, Vol. 26, No. 8, 729-735
- Gánti, T. (2003) *Chemoton Theory*. Vol. 1. Theoretical Foundation of Fluid Machineries. Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- Gánti, T. (2003) *Chemoton Theory*. Vol. 2. Theory of Living Systems. Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- Gánti, T. (2003) *The Principles of Life*. Oxford University Press.
- García Barreno, P. (2009) *Mecanotransducción. Una aproximación tensegridal*. En: Ortiz, J. M., Cascales, M (eds.) *Redes de Señalización y Estrategias Terapéuticas*. Real Academia Nacional de Farmacia. Monografía XXIV, Madrid.
- Gehenio, P. M. (1944) *Longevity of the sclerotia of myxomycetes*. Biodynamica Vol. 4, Nº 4, pp. 359-368.
- Gerhart, J., Kirschner, M. (1997) *Cells, embryos and evolution*. Cambridge, MA: Blackwell Science.
- Gerisch, G, Machow, D., Roos, W., Wick, U. (1979) *Oscillations of Cyclic nucleotide concentrations in relation to excitability of Dictyostelium cells*. Journal of Experimental Biology. Vol. 81, pp. 33-47.
- Gerisch, G. (1968) *Cell Aggregation and Differentiation in Dictyostelium*. Current Topics in Developmental Biology, Volume 3, 1968, pp. 157-197.

- Gerisch, G., Ecke, M. (2005) *Chemotaxis of aggregating Dictyostelium cells*. En: Marí-Beffa, M., Knight, J. (eds.) (2005) *Key experiments in practical developmental biology*. Cambridge University Press. pp. 50-65.
- Gibson, J. J. (1962) *Observations on active touch*. *Psychological Review*. Vol. 69, No. 6, pp. 477-491.
- Gibson, J. J. (1972) *A Direct Theory of Visual Perception*. En J. R. Royce y W. W. Rozeboom (comps.): *The Psychology of Knowing*. Nueva York, Gordon. & Breach.
- Gibson, J. J. (1977) *The Theory of Affordances*. En R. Shaw & J. Bransford (Eds.). *Perceiving, Acting, and Knowing: Toward an Ecological Psychology*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum. pp. 67-82.
- Gibson, J. J. (1979) *The Ecological Approach to Visual Perception*. Boston, Houghton Mifflin.
- Gibson, J. J. (1986) *The Ecological Approach to Visual Perception*. Taylor & Francis Group. Psychology Press.
- Glick, T. F., Livesey, S. J., Wallis, F. (Eds.) (2005) *Medieval science, technology, and medicine: an encyclopedia*. Routledge Taylor & Francis Group. New York, N. Y.
- Godfrey-Smith, P. (1996) *Complexity and the Function of Mind in Nature*. Cambridge University Press.
- Godfrey-Smith, P. (2002a) *Environmental Complexity and the Evolution of Cognition*. En R. Sternberg and J. Kaufman (eds.) *The Evolution of Intelligence*. Mahwah: Lawrence Erlbaum, pp. 233-249.
- Godfrey-Smith, P. (2002b) *Environmental complexity, signal detection and the evolution of cognition*. En G. M. B. Marc Bekoff, Colin Allen (Ed.), *The Cognitive Animal*, capítulo 18, MIT Press. pp. 135–141.
- Goldstein, L. (2001). *Kinesin molecular motors: Transport pathways, receptors, and human disease*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, Vol. 98(13), pp. 6999–7003.
- Goodwin, B. C. (1976a) *Analytical Physiology of Cells and Developing Organisms*. London: Academic Press.
- Goodwin, B. C. (1976b) *On some relationships between embryogenesis and cognition*. *Theoria to Theory*. Vol. 10, pp. 33-44.
- Goodwin, B. C. (1977) In *International Workshop on the Cognitive Viewpoint* (M. deMey, R. Pinxten, M. Poriau & F. Vandamme, Eds). Belgium: University of Ghent Press, pp. 396-400.

- Goodwin, B. C. (1978) *A cognitive view of biological process*. Journal of Social and Biological Structures, Vol 1 (2). pp. 117–125.
- Görllich, D., Artmann, S., Dittrich, P. (2011) *Cells as semantic systems*. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects, Vol. 1810 (10), pp. 914–923.
- Görllich, D., Dittrich, P. (2013) *Molecular Codes in Biological and Chemical Reaction*. PLoS ONE. Vol. 8 N° 1, e54694.
- Gray, P., Scott, S. K. (1984) *Autocatalytic reactions in the isothermal continuous stirred tank reactor oscillations and instabilities in the system  $a + 2b \rightarrow 3b$ ,  $b \rightarrow c$* . Chemical Engineering Science, Vol. 39, pp. 1087–1097.
- Gregor, T., et al. (2010) *The Onset of Collective Behavior in Social Amoebae*. Science, 328, 1021-1025.
- Griesemer, J., Szathmáry, E. (2009). *Ganti's Chemoton model and life criteria*. En S. Rasmussen, M. Bedau, L. Chen, D. Deamer, D. C. Krakauer, N. H. Packard y P. F. Stadler (eds.). Protocells. Bridging Nonliving and Living Matter. Cambridge MA: MIT Press, pp. 481-513.
- Guijarro, P. (2006) *Función de Netrina1 y Semaforinas secretables en la guía neuronal y axonal en el hipocampo y el cerebelo*. Tesis doctoral. Facultad de Biología. Departamento de Biología Celular. Universidad de Barcelona.
- Haeckel, E. (1877) *Die heutige Entwicklungslehre im Verhältnisse zur Gesamtwissenschaft. Vortrag, in der ersten öffentlichen sitzung der fünfzigsten Versammlung deutscher naturforscher und aerzte zu München am 18. september 1877 gehalten*. Stuttgart, E. Schweizerbart's verlagshandlung (E. Koch).
- Haeckel, E. H. P. A. (1866) *Generelle Morphologie der Organismen: allgemeine Grundzüge der organischen Formen-Wissenschaft, mechanisch begründet durch die von C. Darwin reformirte Decendenz-Theorie*. Berlin. Reimer.
- Haeckel, E. H. P. A. (1904) *Kunstformen der Natur*. Leipzig und Wien: Verlag des Bibliographischen Instituts.(1899-1904)
- Haken, H. (1977) *Synergetics – An Introduction: Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry and Biology*. Springer Verlag, Berlin.
- Haken, H. (1987) *Synergetics: An Approach to Self-Organization*. En: “Self-Organizing Systems: The Emergence of Order” edited by F. Eugene Yates, 21, Plenum Publishing Corporation. pp. 417–434.
- Halvorsrud, R., Giaever, I., Laane, M. M., Feder, J., Jossang, T. (1993) *Variations in the biological clock of the slime mold Physarum polycephalum measured electrically*. Journal of Interdisciplinary Cycle Research. Vol. 24, pp. 81–89.

- Hämäläinen, R. P., Saarinen, E. (2004) *Systems Intelligence - Discovering a hidden competence in human action and organizational life*. Systems Analysis Laboratory Research Reports. Helsinki University of Technology. Helsinki, Finland.
- Hameroff, S.R., Rasmussen, S., Mansson, B.(1989) *Molecular automata in microtubules: basic computational logic for the living state?* in *Artificial Life, the Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity*, Vol. VI, pp. 521–53, ed. C. Langton, Reading, MA: Addison-Wesley.
- Hanczyc, M. M., Ikegami, T. (2010) *Chemical Basis for Minimal Cognition*. *Artificial Life* 16, pp. 233-243.
- Hartwell, L. H., Hopfield, J. J., Leibler, S., Murray, A. W. (1999) *From molecular to modular cell biology*. *Nature*, Vol. 402, supp. 2, (02.12.1999), pp. c47-c52.
- Hatano, S., Totsuka, T., Oosawa, F (1967) *Polymerization of plasmodio actin*. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Protein Structure*, Vol. 140 (1), pp. 109-122.
- Hatori, K., Honda, H., Matsuno, K. (1996) *Communicative interaction of myosins along an actin filament in the presence of ATP*. *Biophysical Chemistry*, Vol. 60 (3), pp. 149-152.
- Heidel, A. J., Lawal, H. M., Felder, M., Schilde, C., Helps, N. R., Tunggal, B., Rivero, F., John, U., Schleicher, M., Eichinger, L., Platzer, M., Noegel, A. A., Schaap, P., Glöckner, G. (2011) *Phylogeny-wide analysis of social amoeba genomes highlights ancient origins for complex intercellular communication*. *Genome Research* N° 21, pp. 1882-1891.
- Helikar, T., Konvalina, J., Heidel, J., Rogers, J. A. (2008) *Emergent decision-making in biological signal transduction networks*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 105(6), pp. 1913–1918.
- Hellingwerf, K. J. (2005) *Bacterial observations: a rudimentary form of intelligence?* *Trends in Microbiology* 13 (4) pp. 152-158.
- Hoffmeyer, J. (1996) *Signs of Meaning in the Universe*. Indiana University Press.
- Hoffmeyer, J. (2008) *The Semiotic Niche*. *Journal of Mediterranean Ecology*, Vol. 9, pp. 5-3.
- Hoffmeyer, J.(2002)*Code duality revisited*. *SEED* Vol 2, N°1, pp. 98–117.
- Hoffmeyer, J., Emmeche, C. (1991) *Code-Duality and Semiotics of Nature*. En: Myrdene Anderson and Floyd Merrell (eds.): “On Semiotic Modeling”. Mouton de Gruyter, Berlin and New York. pp.117-166.

- Howard, F. L. (1931a) *The Life History of Physarum polycephalum*. American Journal of Botany, Vol. 18 (2), pp. 116-133.
- Howard, F. L. (1931b) *Laboratory Cultivation of Myxomycete Plasmodia*. American Journal of Botany, Vol. 18 (8), pp. 624-628.
- Howard, F. L. (1932) *Nuclear Division in Plasmodia of Physarum*. Annals of Botany, Vol. 46. No. 183, pp. 461-479.
- Hull, D. (1980) *Individuality and Selection*. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics. 11, 311-332.
- Ikegami, T., Suzuki, K. (2008) *From a homeostatic to a homeodynamic self*. BioSystems N° 91. pp. 388–400.
- Ingber, D. E. (1993a) *The riddle of morphogenesis: a question of solution chemistry or molecular cell engineering?* Cell 75, 1249-1252.
- Ingber, D. E. (1993b) *Cellular tensegrity: defining new rules of biological design that govern the cytoskeleton*. Journal of Cell Science. N° 104, pp. 613-627.
- Ingber, D. E. (1997) *Tensegrity: the architectural basis of cellular mechanotransduction*. Annual Review of Physiology. N° 59, 575–599.
- Ingber, D. E. (1998) *The architecture of life*. Scientific American. N° 278, pp. 48-57.
- Ingber, D. E. (2000) *The origin of cellular life*. Bioessays. N° 22, pp. 1160-1170.
- Ingber, D. E. (2003a) *Tensegrity I. Cell structure and hierarchical systems biology*. Journal of Cell Science. N° 116, pp. 1157-1173.
- Ingber, D. E. (2003b) *Tensegrity II. How structural networks influence cellular information-processing networks*. Journal of Cell Science. N° 116, 1397-1408.
- Ingber, D. E., Dike, L., Hansen, L., Karp, S., Liley, H., Maniotis, A., McNamee, H., Mooney, D., Plopper, T.G., Sims, J., Wang, N. (1994) *Cellular tensegrity: exploring how mechanical changes in the cytoskeleton regulate cell growth, migration and tissue pattern during morphogenesis*. En: Gordon, R., Goodwin, B. C., Jeon, K. W., Jarvik, J. (eds.) Mechanical Engineering of the Cytoskeleton in Developmental Biology. International Review of Cytology, Vol. 150. Academic Press. pp. 173-224.
- Ingber, D. E., Jamieson, J. D. (1995) *Cells as Tensegrity Structures. Architectural Regulation of Histodifferentiation by Physical Forces Transduced over Basement Membrane*. En: Gene Expression During Normal and Malignant Differentiation, (L. C. Anderson, C. G. Gahmberg, and P. Ekblom, eds.; Orlando, Fla.: Academic Press, 1985), pp. 13-32.

Ingber, D. E., Heidemann, S. R., Lamoureux, P., Buxbaum, R. E. (2000) *Opposing views on tensegrity as a structural framework for understanding cell mechanics*. Journal of Applied Physiology. Vol. 89, N° 4, pp. 1663-1678.

Ingber, D., Wang, N., Stamenovic, D. (2014) *Tensegrity, cellular biophysics, and the mechanics of living systems*. Reports on Progress in Physics. Vol. 77, N°4, 046603.

Ishigami, M. (1986a) *Dynamic aspects of the contractile system in Physarum plasmodio I. Changes in Spatial Organization of the Cytoplasmic Fibrils According to the Contraction-Relaxation Cycle*. Cell Motility and the Cytoskeleton, N°6, pp. 439-447

Ishigami, M. (1986b) *Dynamic aspects of the contractile system in Physarum plasmodio II. Contractility of Triton Cell Models in Accordance With the Contraction and Relaxation Phases of the Plasmodia*. Cell Motility and the Cytoskeleton, N°6, pp. 448-457.

Ishigami, M. (1990) *Dynamic aspects of the contractile system in Physarum plasmodio IV. Local Asynchronism in the Generation Cycle of Actomyosin Fibrils and its Relationship to the Shuttle Streaming*. Proceedings of the Japan Academy, Vol. 66, Ser. B, pp. 105-109.

Ishigami, M., Kuroda, K., Hatano, S. (1987) *Dynamic aspects of the contractile system in Physarum plasmodio III. Cyclic Contraction-Relaxation of the Plasmodial Fragment in Accordance with the Generation-Degeneration of Cytoplasmic Actomyosin Fibrils*. The Journal of Cell Biology, Vol. 105, pp. 381-386.

Izhikevich E. M. (2007) *Dynamical Systems in Neuroscience: The Geometry of Excitability and Bursting*. The MIT Press, Cambridge, MA.

Jashemski, W. F., Meyer, F. G., Ricciardi, M. (2002 /1910) *The natural history of Pompeii*. Cambridge University Press.

Jennings, H. S. (1899a) *The Psychology of a Protozoan*. The American Journal of Psychology, Vol. 10, No. 4, pp. 503-515.

Jennings, H. S. (1899b) *Studies on Reactions to Stimuli in Unicellular Organisms, III*. The American Naturalist. Vol. 33, N° 389, pp. 373-389,

Jennings, H. S. (1906) *Behavior of the Lower Organisms*. Columbia University Press, New York.

Jennings, H. S. (1908) *The Interpretation of the Behavior of the Lower Organisms*. Science, New Series, Vol. 27, No. 696 (May 1, 1908), pp. 698-710.

Ji, S. (2012) *The Information-Entropy Relations*. En: Ji, S. (2012) *Molecular Theory of the Living Cell: Concepts, Molecular Mechanisms, and Biomedical Applications*. Springer, New York. pp. 97-101.

- Jonas, H. (1953) *Motility and emotion: An essay in philosophical biology*. Proceedings of the Ninth International Congress of Philosophy 7: 117–122.
- Jonas, H. (1973) *Organismus und Freiheit. Ansätze zu einer philosophischen Biologie*. Göttingen: Vandenhoeck und Ruprecht.
- Jonas, H. (1992) *Philosophische Untersuchungen und metaphysische Vermutungen*. Frankfurt am Main: Insel.
- Jones, J. (2015) *From Pattern Formation to Material Computation. Multi-agent Modelling of Physarum Polycephalum*. Emergence, Complexity and Computation. Volume 15. Springer International Publishing Switzerland.
- Jones, J., Adamatzky, A. (2013) *Slime mould inspired generalised voronoi diagrams with repulsive fields*. International Journal of Bifurcation and Chaos. ISSN 0218-1274. <http://arxiv.org/pdf/1503.06973.pdf>
- Jonker, C. M., Snoep, J. L., Treur, J., Westerhoff, H. V., & Wijngaards, W. C. A. (2001). *Embodied intentional dynamics of bacterial behaviour*. En R. Pfeifer & M. Lungarella. (Eds.), Proceedings of the international workshop on emergence and development of embodied cognition (pp. 465–466). New York: ACM Press.
- Jump, J. A. (1954) *Studies on Sclerotization in Physarum polycephalum*. American Journal of Botany, Vol. 41, No. 7, pp. 561-567
- Kamiya, N. (1940) *The Control of Protoplasmic Streaming*. Science. New Series, Vol. 92, No. 2394, pp. 462-463.
- Kamiya, N. (1942) *Physical Aspects of Protoplasmic Streaming*. In Seifriz, W. Ed. A symposium on the structure of protoplasm. The Iowa State College Press. pp. 199-244.
- Kamiya, N. (1950a) *The Rate of the Protoplasmic Flow in the Myxomycete Plasmodium I*. Cytologia, Vol. 15 (1950) No. 3-4, pp.183-193.
- Kamiya, N. (1959) *Protoplasmic streaming*. Protoplasmatology VIII/3/a, pp.1-199. Springer-Verlag, Viena.
- Kamiya, N. (1960) *Physics and chemistry of protoplasmic streaming*. Annual Review of Plant Physiology. Vol 11, pp. 324-341.
- Kamiya, N. (1981) *Physical and Chemical Basis of Cytoplasmic Streaming*. Annual Review of Plant Physiology. Vol 32, pp. 205-36.
- Kamiya, N. (1989) *My early career the involvement of World War II*. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology. Vol. 40, pp. 1–18.

- Kamiya, N., Abe, S. (1950) *Bioelectric phenomena in the myxomycete plasmodio and their relation to protoplasmic flow*. Journal of Colloid Science, Volume 5, Issue 2, pp. 149–163.
- Kamiya, N., Seifriz, W. (1954) *Torsion in a protoplasmic thread*. Experimental Cell Research, Vol. 6, Issue 1, pp. 1-16.
- Kant, I. (1786 - 1790) *Kritik der Urteilskraft*. Berlin und Libau, bey Lagarde und Friederich. LVIII und 477 Seiten. Ejemplar en castellano: *Crítica del Juicio*. Espasa Calpe, Col. Austral. (1995), 6ª edición. Traducción: Manuel Garcia Morente.
- Kauffman, S. (1974) *Measuring a Mitotic Oscillator. The Arc Discontinuity*. Bulletin of Mathematical Biology. Vol. 36, pp. 171-182.
- Kauffman, S. (1990) *The Science of Complexity and Origins of Order*. Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association, 2, pp. 299-322.
- Kauffman, S., Wille., J. J. (1975) *The Mitotic Oscillation Physarum polycephalum*. Journal of Theoretical Biology. Vol. 55, pp. 47-93.
- Keijzer, F. A. (2001) *Representation and behavior*. Cambridge: The MIT Press.
- Keijzer, F. A. (2003a) *Making decisions does not suffice for minimal cognition*. Adaptive Behavior, 11(4), 266-269.
- Keijzer, F. A. (2003b) *Self-steered Self-Organization*. En W. Tsachacher & J. Dauwalder (Eds.) *The Dynamical Systems Approach to Cognition. Concepts and Empirical Paradigms Based on Self-Organization, Embodiment, and Coordination Dynamics*. London: World Scientific.
- Keller, E. F. (1980) *Assessing the Keller-Segel model: how has it fared?* En: W. Jäger, H. Rost and P. Tautu (Eds) “Biological Growth and Spread”, Lecture Notes in Biomathematics, Vol. 38, pp. 379-387. Berlin: Springer.
- Keller, E., Segel, L. A. (1970) *Initiation of Slime Mold Agregation Viewed as an Instability*. Journal of Theoretical Biology N° 36, pp. 399-415.
- Keller, E., Segel, L. A. (1971) *Model for chemotaxis*. Journal of Theoretical Biology N° 30, pp. 225-234.
- Keller, E., Segel, L. A. (1971b) *Traveling bands of chemotactic bacteria. A theoretical analysis*. Journal of Theoretical Biology N° 30, pp. 235-248.
- Kerr, S.J. (1967) *A comparative study of mitosis in amoebae and plasmodia of the true slime mold Didymium nigripes*. Journal of Protozoology. N° 14, pp. 439-445.

- Kessin, R. H., Franke, J. (2001) *Dictyostelium: evolution, cell biology, and the development of multicellularity*. Cambridge University Press.
- Kitano, H. (ed.) (2001) *Foundations of Systems Biology*. MIT Press. Cambridge MA.
- Kitano, H. (2004) *Biological Robustness*. Nature Rev Genet, 5(11):826-837.
- Knoles, D. J., Carlie, M. J. (1978) *The chemotactic response of plasmodia of the myxomycete Physarum polycephalum to sugars and related compounds*. Journal of General Microbiology. Vol. 108, pp. 17-25.
- Kock, C. (2012) *Modular Biological Complexity*. Science, Vol. 337 (03.08. 2012) pp. 531-532.
- Kondo, S., Miura, T. (2010) *Reaction-Diffusion Model as a Framework for Understanding Biological Pattern Formation*. Science (329) pp. 1616-1620. (with supporting online material)
- Konijn, T. M., Raper, K. B. (1966) *The influence of light on the size of aggregations in Dictyostelium discoideum*. Biological Bulletin, Vol. 131, N° 3, pp. 446-456.
- Konijn, T., van der Meene, J. G. C., Bonner, J. T., Barkley, D. S. (1967) *The Acrasin Activity of Adenosine-3',5'- Cyclic Phosphate*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Vol 58, n° 3, pp. 1152-1154.
- Konijn, T., van der Meene, J. G. C., Chang, Y. Y., Barkley, D. S., Bonner, J. T. (1969) *Identification of Adenosine-3',5'-Monophosphate as the Bacterial Attractant for Myxamoebae of Dictyostelium discoideum*. Journal of Bacteriology, Vol. 99, N° 2, pp. 510-512.
- Koretke, K. K., Lupas, A. N., Warren, P. V., Rosenberg, M., & Brown, J. R. (2000). *Evolution of Two-Component Signal Transduction*. Molecular Biology and Evolution, Vol. 17, pp. 1956–1970.
- Korzybski, A. (1933) *Science and Sanity: An Introduction to Non-Aristotelian Systems and General Semantics*. Institute of General Semantics. 5<sup>a</sup> Ed. (1994)
- Koshland, D. E., Jr. (1977) *A response regulator model in a simple sensory system*. Science N° 196, pp. 1055–1063
- Koshland, D. E., Jr. (1980a) *Bacterial Chemotaxis in Relation to Neurobiology*. Annual Review of Neuroscience. Vol.3, pp. 43–75.
- Koshland, D. E., Jr. (1980b) *Bacterial Chemotaxis as a Model Behavioral System*. New York, NY: Raven Press.

Koshland, D. E., Jr., Goldbeter, A., Stock, J. B. (1982) *Amplification and adaptation in regulatory and sensory systems*. Science, Vol. 217, N° 4556, pp. 220-225.

Kováč, L. (2000) *Fundamental principles of cognitive biology*. Evolution and Cognition. Vol.6.

Kováč, L. (2006a) *Princípy molekulárnej kognície*. En: Kelemen, J., Kvasnička, V. (eds.) Kognice a umělý život VI. Slezská univerzita, Opava, pp. 215-222.

Kováč, L. (2006b) *Life, chemistry and cognition: Conceiving life as knowledge embodied in sentient chemical systems might provide new insights into the nature of cognition*. European Molecular Biology Organization. Vol. 7, N° 6, pp. 562–566.

Krampen, M (1981) *Phytosemiotics*. Semiotica. Vol. 36 (3/4) pp.187–209.

Krishnan, J., Liu, C. (2014) *An Investigation of Signal Transduction and Irreversible Decision Making Through Monostable and Bistable Switches*. En: Kulkarni, V. V., Stan, G-B., Raman, K. (eds.) A Systems Theoretic Approach to Systems and Synthetic Biology II-Analysis and Design of Cellular System. Springer. Cap. 9. pp. 219-243.

Kuramoto, Y, Nishikawa, I (1988) *Onset of Collective Rhythms in Large Populations of Coupled Oscillators*. En: H. Takayama (ed.) Cooperative Dynamics in Complex Physical Systems, Volume 43 de Springer Series in Synergetics. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1989, pp. 300-306.

Langston, R. F., et al. (2010) *Development of the Spatial Representation System in the Rat*. Science, 328, pp. 1576-1580.

Latty, T., Beekman, M. (2009) Food quality affects search strategy in the acellular slime mould, *Physarum polycephalum*. Behavioral Ecology. Vol. 20, N° 6, pp. 1160-1167.

Latty, T., Beekman, M. (2010) Food quality and the risk of light exposure affect patch-choice decisions in the slime mold *Physarum polycephalum*. Ecology, Vol. 91. N° 1, pp. 22-27.

Latty, T., Beekman, M. (2011a) *Irrational decision-making in an amoeboid organism: transitivity and context-dependent preferences*. Proceedings of the Royal Society B. Biological Science. Vol. 278. N° 1703. pp. 307-312.

Latty, T., Beekman, M. (2011b) *Speed–accuracy trade-offs during foraging decisions in the acellular slime mould *Physarum polycephalum**. Proceedings of Royal Society B. Vol. 278, pp. 539-545.

Latty, T., Ramsh, K., Ito, K., Nakagaki, T., Sumpter, D. J. T., Middendorf, M., Beekman, M. (2011) *Structure and formation of ant transportation networks*. Journal of Royal Society. Interface Vol. 8, pp. 1298–1306.

- Latty, T., Beekman, M. (2015) *Brainless But Multi-Headed: Decision-Making by the Acellular Slime Mould Physarum Polycephalum*. *Journal of Molecular Biology*.
- Lazopoulos, K. A. (2005) *Stability of an elastic cytoskeletal tensegrity model*. *International Journal of Solids and Structures*, 42, pp. 3459–3469.
- Lee, K. J., McCormick, W. D., Ouyang, Q., Swinney, H. L. (1993) *Pattern Formation by Interacting Chemical Fronts*. *Science, New Series*, Vol. 261, No. 5118 (Jul. 9, 1993), pp. 192-194.
- Lengeler, J. W., Postma, P. W. (1999) *Global networks and signal transduction pathways*. In J. W. Lengeler, G. Drews, & H. G. Schlegel (Eds.) *Biology of the Prokaryotes*. London: Blackwell Science.
- Lengeler, J. W., Müller, B. S., & di Primio, F. (2000). *Neubewertung kognitiver Leistungen im Lichte der Fähigkeiten einzelliger Lebewesen*. *Kognitionswissenschaft*, 8, pp.160–178
- Lenoir, T. (1980) *Kant, Blumenbach, and Vital Materialism in German Biology*. *Isis* 71: 77-108.
- Lenoir, T. (1982) *The Strategy of Life: Teleology and Mechanics in Nineteenth-Century German Biology*. University of Chicago Press.
- Lenoir, T. (1988) *Kant, Von Baer, and Causal-Historical Thinking in Biology*. *Poetics Today*, Vol. 9, No. 1. Págs.103-115.
- Leon, J. de (1884) *Elementos de botánica, conformes al programa de la Universidad Mayor de la República entresacados de Payer, Sachs, Van Tieghem, Lanessan*. Montevideo Biblioteca Ilustrada de Andrés Ríus.
- Llinás, R. R. (2001) *I of the Vortex, From Neurons to Self*, MIT Press. En castellano: *El cerebro y el mito del yo*. Editorial Belacqua (2003).
- Loidl, P., Sachsenmaier W. (1982) *Control of mitotic synchrony in Physarum polycephalum. Phase shifting by fusion of heterophasic plasmodia contradicts a limit cycle oscillator model*. *European Journal of Cell Biology*. Vol. 28 (2), pp. 175-179.
- López-Sánchez, M. E., Honrubia, M., Gracia, E., Gea, F. J. (1987) *Revisión bibliográfica sobre la biología de los mixomicetos*. Serie Micológica. Secretariado de publicaciones e intercambio científico. Universidad de Murcia.
- Lovely, J. R., Threlfall, R. J. (1979) *The activity of guanylate cyclase and cyclic GMP phosphodiesterase during synchronous growth of the acellular slime mould Physarum polycephalum*. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. Vol. 86, Nº. 2, pp. 365-370. (\*)

- Luisi, P. L. (1998) *About Various Definitions of Life*. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 28, pp. 613–622.
- Luisi, P. L. (2006) *The Emergence of Life: from Chemical Origin to Synthetic Biology*. Cambridge University Press. En castellano: *La vida emergente. De los orígenes químicos a la biología sintética*. Tusquets Ediciones. Barcelona, 2010.
- Luisi, P. L., Varela, F. J (1989) *Self-replicating micelles — A chemical version of a minimal autopoietic system*. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 19, pp. 633-643.
- Luisi, P. L., Bersini, H., Stano, P., Bedau, M. A. (2010) *Philosophical and scientific perspectives on emergence*. *Synthese*, 173. In press.
- Luisi, P. Luigi, Damiano, L. (2010) *Towards an Autopoietic Redefinition of Life*. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 40, pp. 145–149
- Lyon, P. (2006a) *The Agent in the Organism: Toward a Biogenic Theory of Cognition*. PhD thesis, The Australian National University, Canberra.
- Lyon, P. (2006b) *The biogenic approach to cognition*. *Cognitive Processing*. Vol. 7. N° 1, pp. 11-29.
- Lyon, P. (2013a). *Foundations for a Cognitive Biology*. Published on the homepage of the Cognitive Biology Project at the University of Adelaide.
- Lyon, P. (2013b). *Why Cognitive Biology?* Publicado en el html de Lyon (2013a). <http://www.hss.adelaide.edu.au/philosophy/cogbio/why/>
- Lyon, P., Keijzer F. (2007). *The human stain*. En Wallace, B. (ed.) *The mind, the body, and the world: psychology after cognitivism?* Imprint Academic, 2007. pp. 132-165.
- Lyon, P., Opie, J. (2007). *Prolegomena for a cognitive biology*. *Proceedings of the 2007 Meeting of International Society for the History, Philosophy and Social Studies of Biology*, University of Exeter.
- Madigan, M., Martinko, J., Dunlap, P., Clark, D. (2008) *Brock biology of microorganisms* (12<sup>a</sup> ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Higher Education.
- Manson, M. D., Armitage, J. P., Hoch, J. A., Macnab, R. M. (1998) *Bacterial locomotion and signal transduction*. *Journal of Bacteriology*, Vol. 180, N° 5, pp. 1009–1022.
- Marcus, S. (2001) *On the logical and semiotic status of Jakob von Uexkülls concept of Umwelt*. *Semiotica*. Volume 2001, Issue 134, Pages 201–210

Margulis, L., Guerrero, R. (1991) *Two plus three equal one. Individuals emerge from bacterial communities*. En: Thompson, W. I.(ed.) Gaia 2. Emergence. The new science of becoming. Hudson, NY: Lindisfarne Press.

Marsland, D. A. (1942) *Protoplasmatic streaming in relation to gel structure in the cytoplasm*. In Seifriz, W. Ed. A symposium on the structure of protoplasm. The Iowa State College Press. pp. 127-162.

Martiel, J. L., Goldbeter, A. (1985) *Autonomous chaotic behaviour of the slime mould Dictyostelium discoideum predicted by a model for cyclic AMP signaling*. Nature 313(14 February), pp. 590-592.

Martin, G. W. (1940) *The Myxomycetes*. The Botanical Review Volume 6 (7), pp. 356-388.

Matsuno, K. (2008) *Molecular Semiotics toward the Emergence of Life*. Biosemiotics, Vol.1. pp. 131–144.

Maturana, H. R. (1970) *Biology of Cognition*. Reimpreso en Maturana, H. R., Varela, F. J. (1980) *Autopoiesis: The Organization of the Living*. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland.

Maturana, H. R. (1996) *Was ist Erkennen? Die Welt entsteht im Auge diciembre Betrachters*. Goldmann Verlag. pp. 221.

Maturana, H. R. (1995a) *La Realidad: ¿Objetiva o Construida?*. Editorial Anthropos, tomo I, Barcelona.

Maturana, H. R. (1995b) *Origen de las especies por medio de la deriva natural, o La diversificación de los linajes a través de la conservación y cambio de los fenotipos ontogénicos*. En “La Realidad: ¿Objetiva o Construida?”. Editorial Anthropos, tomo I, Barcelona.

Maturana, H. R., Varela, F. (1980) *Autopoiesis and cognition: The realization of the living*. Boston: D. Reidel.

Maturana, H. R., Varela, F. J. (1994) *De Máquinas y Seres Vivos. Autopoiesis: La Organización de lo Vivo*. Ed. Universitaria. Santiago de Chile.

Mayne, R., Adamatzky, A., Jones, J. (2015) *On the role of the plasmodial cytoskeleton in facilitating intelligent behaviour in slime mould Physarum polycephalum*. Communicative & Integrative Biology. Vol. 8, N° 4: E1059007

Mayne, R., Tsompanas, M.-A., Sirakoulis, G. Ch., Adamatzky, A. (2015) *Towards a Slime Mould-FPGA Interface*. Biomedical Engineering Letter Vol. 5, pp. 51-57

Medina, A. E., et al (2006) *Restoration of Neuronal Plasticity by a Phosphodiesterase Type 1 Inhibitor in a Model of Fetal Alcohol Exposure*. The Journal of Neuroscience, January 18, 2006, 26(3) pp. 1057-1060.

Merleau-Ponty, M (1945) *Phénoménology de la perception*. Gallimard. En castellano: Fenomenología de la percepción. Ediciones Península (1993).

Merleau-Ponty, M (1963) *The structure of behavior* (trans: Fisher A). Dusquene University Press, Pittsburgh, PA

Minge, M. A., Cavalier-Smith, T. et al (2009) *Evolutionary position of breviate amoebae and the primary eukaryote divergence*. Proceedings of Royal Society B, Vol. 276, pp. 597-604.

Mir, L., Wright, M., Moisand A. (1980) *Centriole maturation in the amoebae of Physarum polycephalum*. Protoplasma. Vol. 105 (1-2). pp. 149-160.

Mir, L., Wright, M., Moisand A. (1984) *Variations in the number of centrioles, the number of microtubule organizing centers 1 and the percentage of mitotic abnormalities in Physarum polycephalum amoebae*. Protoplasma. Vol. 120 (1-2). pp. 20-35.

Mittelstrass, J. (2001) *On Transdisciplinarity*. In: Science and the Future of Mankind: Science for Man and Man for Science. Pontificiae Academiae Scientiarum Scripta Varia. Nº 99. The Pontifical Academy of Sciences. pp. 495-500.

Monod, J. (1970) *El Azar y la Necesidad. Ensayo sobre la Filosofía Natural de la Biología Moderna*. Ed. Tusquets. Col. Metatemas. 6ª edición 2000. Barcelona.

Moreno, A., Merelo, J. J., Etxeberria, A. (1992). *Perception, adaptation and learning*. En B. McMullin and N. Murphy (Eds.) Proceedings of the Workshop on Autopoiesis and Perception. Dublin: Dublin City University. pp. 65–70

Moreno, A., Umerez, J., Ibañez, J. (1997) *Cognition and Life. The Autonomy of Cognition*. Brain & Cognition, 34, 107-129.

Moreno, A., Umerez, J. (2000) *'Downward Causation' at the Core of Living Organization*. P.B. Andersen, C. Emmeche, N.O. Finnemann & P.V. Christiansen (eds.) Downward Causation, Aarhus: Aarhus University Press, pp. 99-117.

Moreno, A., Etxeberria, A. (2005) *Agency in natural and artificial systems*. Artificial Life 11, pp.161–175.

Mori, Y., Ueda, T., Kobatake, Y. (1987) *NAD(P)H oscillation in relation to the rhythmic contraction in the Physarum polycephalum*. Protoplasma, Vol. 139, pp. 141-144.

Mori, Y., Koaze, A. (2013) *Cognition of different length by Physarum polycephalum. Weber's law in an amoeboid organism*. Mycoscience, Vol. 54, pp. 426-428.

- Morin, E. (1986) *La Methode III. La connaissance de la connaissance*. Éditions de Seuil. En castellano: *El Método III. El conocimiento del conocimiento*. Ediciones Cátedra(1999).
- Mossio, M., Saborido, C., & Moreno, A. (2009). *An organizational account of biological functions*. British Journal of Philosophy of Science, Vol. 60, N° 4, pp. 813–841.
- Mossio, M., Bich, L., Moreno, A. (2013). *Emergence, closure and inter-level causation in biological systems*. Erkenntnis, Vol.78, N° 2, pp. 153–178.
- Mossio, M., Bich, L. (2014) *What makes biological organisation teleological?* Synthese, Vol. 191, published 21 November 2014, pp.1-26
- Müller, B. S., di Primio, F., Lengeler, J. W. (2001) *Contributions of Minimal Cognition to Flexibility*. In N. Callaos, W. Badawy & S. Bozinovski (Eds.), SCI 2001 Proceedings of the 5th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Volume XV, Industrial Systems: Part II, by the International Institute of Informatics and Systemics, 93-98.
- Nagai, R., Yoshimoto Y., Kamiya, N. (1978) *Cyclic production of tension force in the plasmodial strand of Physarum Polycephalum*. Journal of Cell Science N° 33, pp. 205-225.
- Nagumo J., Arimoto S., Yoshizawa S. (1962) *An active pulse transmission line simulating nerve axon*. Proc IRE. 50:2061–2070.
- Naib-Majani, W., Stockem, W., Weber, K., Wehland, J., Wohlfarth-Bottermann, K. E.(1983) *Cytoplasmic Actin Patterns in Physarum as Revealed by NBD-Phalloidin Staining*. Cell Biology International Reports. Vol. 7, No. 8, pp. 637-640.
- Nakagaki, T. (2001a) *Smart behavior of true slime mold in a labyrinth*. Research in Microbiology. Vol.152. pp. 767–770
- Nakagaki, T. (2001b) *Ameboid Organisms May be More Clever than we'd Thought!* RIKEN Newsletter, febrero 2001.
- Nakagaki, T., Yamada, H., Toth, A. (2000) *Maze-solving by an amoeboid-organism*. Nature, 407. pp. 470.
- Nakagaki, T., Yamada, H., Ueda, T. (2000) *Interaction between cell shape and contraction pattern in the Physarum plasmodium*. Biophysical Chemistry. Vol. 84. pp. 195-204.
- Nakagaki, T., Yamada, H. & Hara, M. (2004) *Smart network solutions in an amoeboid organism*. Biophys. Chem. 107, pp. 1–5.

- Nakagaki, T., Kobayashi, R., Nishiura, Y., Ueda, T. (2004) *Obtaining multiple separate food sources; behavioural intelligence in the Physarum plasmodio*. Proc. R. Soc. Lond. B, 271, pp. 2305–2310.
- Nakagaki, T., Kobayashi, R., Tero, A. (2006) *Physarum solver. A biologically inspired method of road-network navigation*. Physica A Statistical Mechanics and its Applications, 363 (1), pp. 115-119.
- Nakagaki, T., Guy, R. (2008) *intelligent behaviors of amoeboid movement based on complex dynamics of soft matter*. Soft Matter, 4, pp. 57–67.
- Nakamura, A., Kohama, K. (1999) *Calcium Regulation of the Actin-Myosin Interaction of Physarum polycephalum*. International Review of Cytology Vol. 191, pp. 53-98
- Neander, K. L. (1991) *The Teleological notion of 'Function'*. Australasian Journal of Philosophy. Vol. 69, No. 4; December 1991. pp. 454-468.
- Neisser, U. (1967) *Cognitive psychology*. New York: Appleton- Century Crofts.
- Newport, J. W., Kirschner, M. W. (1984) *Regulation of the cell cycle during early Xenopus development*. Cell. Vol. 37, pp. 731–742.
- Nicolescu, B. (2008) *The Idea of Levels of Reality and its Relevance for Non-Reduction and Personhood*. Conference of Metanexus Institute: Subject, Self, and Soul: Transdisciplinary Approaches to Personhood. Universidad Pontificia de Comillas, Madrid.
- Nicolis, G., Prigogine, I. (1977) *Self-organization in non-equilibrium systems*. John Wiley & Sons, New York.
- Nietzsche, F. (1906) *Der Wille zur Macht: Versuch zu einer Umwerthung aller Werte* (Aus dem Nachlaß 1884/88), Vol. 2 (Leipzig: Kröner, 1906). En castellano: La Voluntad de Poder. Trad. Dolores Castrillo Mirat. Editorial Edaf, Madrid, 17ª ed. 2009.
- Nikolaev, A. R., et al, (2010) *Duration of Coherence Intervals in Electrical Brain Activity in Perceptual Organization*. Cerebral Cortex, 20(2) pp. 365-382.
- Nishiura, Y. Teramoto, T, Ueda, K.-I.(2003) *Dynamic transitions through scatters in dissipative systems*. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, Vol. 13, Nº3, pp. 962-972.
- Norris, C. H. (1940) *Elasticity studies on the Myxomycete, Physarum polycephalum*. Journal of Cellular and Comparative Physiology. Vol. 16, p. 313.
- Norsell, U., Finger, S., Lajonchere, C. (1999) *Cutaneous sensory spots and the “law of specific nerve energies” : history and development of ideas*. Brain Research Bulletin. Vol. 48 (5) pp. 457-465.

O'Reagan, J. K., Noë, A. (2001). *A sensorimotor account of vision and visual consciousness*. Behavioral and Brain Sciences, Vol. 24, pp. 939-1031

Ortiz de Zárate, A. (2000) *Teorías sobre la conciencia en los últimos años*. Revista de historia de la psicología. Vol. 21, N° 2-3, pp. 341-348.

Osorio, C. G. (2007) *Sobre agentes infecciosos, zoofitos, animálculos e infusorios*. Revista chilena de infectología. Vol. 24. N° 2. pp. 171-174.

Pagh, K. I., Adelman, M. R. (1988) *Assembly, Disassembly, and Movements of the Microfilament-Rich Ridge During the Amoebflagellate Transformation in Physarum Polycephalum*. Cell Motility and the Cytoskeleton, Vol. 11, pp. 223-234.

Palmer, L., Lynch, G. (2010) *A Kantian View of Space*. Science, 328, pp. 1487-1488.

Panikkar, R. (1975) *Cross-Cultural Studies. The Need for a New Science of Interpretation*. Monchanin, n° 3-5, Vol. VIII, p. 12-15.

Panikkar, R. (1979) *Mith, Faith and Hermeneutics, Cross-Cultural Studies*. Paulist, Nova York.

Panikkar, R. (1988) *What is Comparative Philosophy Comparing?* In: Larson, G. J., Deutsch, E. *Interpreting Across Religions Boundaries*. Princeton (New Jersey), Princeton University. pp. 116-136.

Paton, R., Staniford, G., Kendall, G. (1996) *Specifying logical agents in cellular hierarchies*. En: Cuthbertson, R., Holcombe, M., Paton, R. (Ed.) (1996) *Computation in Cellular and Molecular Biological Systems*, World Scientific, Singapore, pp. 105–11.

Paton, R., Matsuno, K. (1998) *Some Common Themes for Enzymes and Verbs*. Acta Biotheoretica, 46 (2), pp. 131-140.

Paton, R.C. (1997) *Glue, verb and text metaphors in biology*. Acta Biotheoretica 45 (1), pp. 1–15.

Pattee, H. H. (1969) *How Does a Molecule Become a Message?* Communication in Development Proceedings of the 28th Symposium, The Society for Developmental Biology, Boulder, CO, June 16-18, 1969. Developmental Biology Supplement N°3, pp. 1-16.

Pattee, H. H. (1973) *Hierarchy Theory: The Challenge of Complex Systems*. Ed. New York: George Braziller.

Pattee, H. H. (1978) *Biological Systems Theory: Descriptive and Constructive Complementarity*. En G.J. Klir (ed.) *Applied General Systems Research*, New York: Plenum, Págs. 511-520.

- Pattee, H. H. (2006) *The Physics of Autonomous Biological Information*. Biological Theory, Vol. 1, No. 3, pp. 224–226.
- Pattee, H. H. (2008) *Physical and Funcional Conditions for Symbols, Codes and Languages*. Biosemiotics, Vol. 1, pp. 147-168.
- Pauly, P. J. (1987) *Controlling Life. Jacques Loeb & the Engineering Ideal in Biology*. Monographs on the History and Philosophy of Biology. Oxford University Press.
- Pearson, J. E. (1993) *Complex Patterns in a Simple System*. Science New Series, Vol. 261, No. 5118 (Jul. 9, 1993), pp. 189-192.
- Peirce, C. S. (1931-1958) *Collected Papers of Charles Sanders Peirce*, vols. 1-8, C. Hartshorne, P. Weiss y A. W. Burks (eds). Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Peirce, C. S. (1931-1958) *Obra Lógico-Semiótica*. Edición de Armando Sercovich. Trad. Alcalde, R., Prelooker, M. Ed. Taurus (1987).
- Pérez Otero, M. *Propiedades teleológicas y superveniencia*. En: Propiedades lógicas y superveniencia. Endoxa: Series Filosóficas, UNED, Madrid. Pp. 121-145.
- Pershin, Y. V.; La Fontaine, S.; Di Ventra, M. (2009) *Memristive model of amoeba learning*. Physical Review E Vol.80. Nº 2. 021926
- Pershin, Y.V., Di Ventra, M. (2011) *Solving mazes with memristors: a massively parallel approach*. Physical Review E. Vol. 84. Nº 4. 046703
- Pfeffer, W. (1880) *Lehrbuch der Pflanzenphysiologie*. Tübingen. En inglés: *The Physiology of Plants: A Treatise Upon the Metabolism and Sources*. English ed. vol. 3. The Clarendon Press, Oxford.
- Pfeffer, W. (1888) *Über chemotaktische Bewegungen von Bacterien, Flagellaten u. Volvocineen*. En: Untersuchungen Botanischen aus dem Institut zu Tübingen. Vol. 2. Verlag von Wilhelm Engelmann, Leipzig. pp. 582-661.
- Pfeffer, W. (1921) *Osmotische Untersuchungen*. Wilh. Engelmann, Leipzig. (2., unveränderte Aufl. des Erstdrucks von 1877).
- Piaget, J. (1967) *Biologie et connaissance*. Gallimard, París
- Pintos-Peñarada, M. L. (2002) *Aron Gurwitsch: Fenomenología de la percepción y encuentro con Kurt Goldstein*. Phainomenon. Revista de Fenomenología 14 (2007), 255-277 / para la versión online: Investigaciones Fenomenológicas, 6 (2008), 327-355, [http://www.uned.es/dpto\\_fim/invfen/InvFen6/17\\_mluz.pdf](http://www.uned.es/dpto_fim/invfen/InvFen6/17_mluz.pdf)

- Pirentis, A. P., Lazopoulos, K. A. (2009) *On the singularities of a constrained tensegrity-cytoskeleton model under equitriaxia loading*. International Journal of Solids and Structures, 47 (6) pp. 759-767.
- Polanyi, M. (1968) *Life's irreducible structure*. Science 160, pp. 1308–1312.
- Pollack, G. H. (2001) *Cells, gels and the engines of life; a new, unifying approach to cell function*. Ebner and Sons Publishers, Washington.
- Pollard, T. D. Weihing, R. R. (1974) *Actin and Myosin and Cell Movement*. Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology, Vol. 2 (1), pp. 1-65.
- Port, R., van Gelder, T. (Eds.) (1995). *Mind as motion: Explorations in the dynamics of cognition*. Cambridge,MA: MIT Press.
- Prigogine, I. (1955/ 1961) *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes*. New York: Interscience.
- Prigogine, I., Nicolis, G. (1977) *Self-Organization In Non-Equilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order Through Fluctuations*, New York, John Wiley and Sons.
- Raper, K. B. (1935) *Dictyostelium discoideum, a New Species of Slime Mold from Decaying Forest Leaves*. Journal Agricultural Research. Vol. 50 (2), pp. 135-148.
- Rasmussen, S., Karampurwala, H., Vaidyanath, R., Jensen, K.S., Hameroff, S. R., (1990) *Computational connectionism within neurons: a model of cytoskeletal automata subserving neural networks*. Physica, D42, pp. 428-449.
- Reid, C. R., Latty, T. Dussutour, A., Beekman, M. (2012) *Slime Mold uses an externalized spatial “memory” to navigate in complex environments*. Proceedings of the National Academy of Sciences. Vol. 109. N° 43, pp.17490-17494.
- Reid, C. R., Beekman, M., Latty, T., Dussutour, A. (2013) *Amoeboid organism uses extracellular secretions to make smart foraging decisions*. Behavioral Ecology, Vol.24, pp. 812-818.
- Reid, C. R., Garnier, S., Beekman, M., Latty, T. (2015) *Information integration and multiattribute decision making in non-neuronal organisms*. Animal Behaviour Vol. 100, pp. 44-50
- Rönkkönen, E., Saarinen, E. (2010) *Fredrickson’s broaden-and-build theory, chemical engineering, and systems intelligence*. In *Essays on Systems Intelligence*, Raimo P. Hämmäläinen and Esa Saarinen, eds., Systems Analysis Laboratory, Aalto University School of Science and Technology, Espoo, Finland.

- Rothschild, L. J. (1989) *Protozoa, Protista, Protoctista: What's in a Name?* Journal of the History of Biology, N° 22, pp. 277–305.
- Rubinstein, B., Jacobson, K., Mogilner, A. (2005) *Multiscale two-dimensional modeling of a motile simple-shaped cell*. Multiscale Modeling & Simulation. Vol 3(2), pp.413-439.
- Ruiz-Mirazo, K., Moreno, A. (2000) *Searching for the roots of autonomy: the natural and artificial paradigms revisited*. CC-AI (Communication and Cognition – Artificial Intelligence) Vol. 17 (3-4), pp. 209-228.
- Ruiz-Mirazo, K., Mavelli, F. (2008) *On the way towards 'basic autonomous agents': Stochastic simulations of minimal lipid-peptide cells*. BioSystems, Vol. 91 (2) pp. 374-387.
- Saccardo, P. A. (1882) *Sylloge Fungorum. Omnium Hucusque Cognitorum*. Vols.VII, XII y XX. Padua; Berlese & Voglino. Patavii, sumptibus auctoris.
- Saigusa, T., Tero, A., Nakagaki, T., Kuramoto, Y. (2008) *Amoebae Anticipate Periodic Events*. Physical Review Letters, Vol. 100, N° 1, 018101.
- Salthe, S. N. (1985) *Evolving Hierarchical Systems: Their Structure and Representation*. New York: Columbia University Press
- Salthe, S. N. (2008a) *Purpose in Nature*. Ludus Vitalis, N°16, pp. 49-58.
- Salthe, S. N. (2008b) *Ecological philosophy: Vitalism versus physical-chemical explanations*. S.E. Jørgensen and B.D. Fath (eds.) The Encyclopedia of Ecology. Elsevier. Volume 5: 3694-3699.
- Salthe, S. N. (2008c) *Natural Selection in Relation to Complexity*. Artificial Life 14: 363–374.
- Salthe, S. N. (2009) *A hierarchical framework for levels of reality: understanding through representation*. Axiomathes, N° 19, pp. 87-99.
- Santos, G. I. (2015) *Upward and Downward Causation, From a Relational-Horizontal Ontological Perspective*. Axiomathes, Vol. 25, N° 1, pp 23-40.
- Sato, M., Wong, T. Z., Allen, R. (1983) *Rheological Properties of Living Cytoplasm. Endoplasm of Physarum Plasmodio*. The Journal of Cell Biology, 97, pp. 1089-1097.
- Satoh, H., Ueda, T. Kobatake, Y. (1985) *Oscillations in cell shape and size during locomotion and in contractile activities of Physarum polycephalum, Dictyostelium discoideum, Amoeba proteus and macrophages*. Experimental Cell Research. Vol. 156, pp.79-90.

Schloegel, J. J., Schmidgen, H. (2002) *General Physiology, Experimental Psychology, and Evolutionism. Unicellular Organisms as Objects of Psychophysiological Research, 1877–1918*. Isis, N° 93, pp. 614–645.

Schweinitz, L. D. de. (1822). *Synopsis Fungorum Carolinae Superioris*. edita a D.(sic) F. Schwaegrichen. Soc. nat. cur. Leipzig. 4:20-132. [Clasificación del Physarum polycephalum pág. 37].

Schweinitz, L. D. de. (1832) *Synopsis Fungorum in America Boreali Media Digentium*. Transactions of the American Philosophical Society. Vol. 4, pp. 141-318. [Clasificación del Physarum polycephalum pág. 257].

Sebeok, T. (1996) *Signos: Una introducción a la semiótica*. Ed. Paidós. Barcelona.

Sebeok, T. A. (1972) *Perspectives in zoosemiotics*. The Hague: Mouton. Sign System Studies Vol. 30 (1). pp. 183-200.

Seifriz, W. (1931) *The Structure of Protoplasm*. Science, Vol. 73, No. 1902, pp. 648-649.

Seifriz, W. (1936) *Protoplasm*. McGraw-Hill Book Company, Inc. New York.

Seifriz, W. (1938) *Recent Contributions to the Theory of Protoplasmic Structure*. Science, Vol. 88, No. 2271, pp. 21-25.

Seifriz, W. (1939) *A Materialistic Interpretation of Life*. Philosophy of Science 6, No 3, pp. 266-284.

Seifriz, W. (1941) *A theory of anesthesia based on protoplasmic behavior*. Anesthesiology Vol. 2, p. 300.

Seifriz, W. (1942) *Some Physical Properties of Protoplasm and Their Bearing on Structure*. In Seifriz, W. Ed. A symposium on the structure of protoplasm. The Iowa State College Press. pp. 245- 266.

Seifriz, W. (1943a) *Creative Imagination and Indeterminism*. Philosophy of Science 10, No 1, pp. 25-33.

Seifriz, W. (1943b) *Protoplasmic Streaming*. Botanical Review, Vol. 9, No. 2, pp. 49-123.

Seifriz, W. (1945) *The Structure of Protoplasm. II*. Botanical Review, Vol. 11, No. 5 (May, 1945), pp. 231-259

Seifriz, W., Kamiya, N. (1940) *Theoretical and experimental studies on protoplasmic streaming*. Science, New Series, Vol. 92, No. 2393, p. 416.

- Seifriz, W., Epstein, N. (1941) *Shock anesthesia in myxomycetes* Seyle, H. (1973) *Homeostasis and heterostasis*. Perspectives in Biology and Medicine Vol. 16(3). pp. 441-5.
- Shaffer, B. M. (1953) *Aggregation in Cellular Slime Moulds: in vitro Isolation of Acrasin*. Nature 171, p.975.
- Shaffer, B. M. (1956) *Acrasin, The Chemiotactic Agent in Cellular Slime Moulds*. Journal of Experimental Biology, N° 33, pp. 645-657.
- Sharov, A. A., (1991) *Biosemiotics: A functional-evolutionary approach to the analysis of the sense of information*. En T. A. Sebeok and J. Umiker-Sebeok (eds.), *Biosemiotics: The Semiotic Web*. 1991, Mouton de Gruyter, Berlin. pp. 345-373.
- Shirakawa, T., Adamazky, A., Gunji, Y.-P., Miyake, Y. (2009) *On Simultaneous Construction of Voronoi Diagram and Delaunay Triangulation by Physarum polycephalum*. International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol. 19, No. 9, pp. 3109–3117.
- Shuster, S. C. et al. (1996) *The hybrid histidine kinase DokA is part of the osmotic response system of Dictyostelium*. The EMBO Journal, 15, n° 15, pp. 3880-3889.
- Skelton, R.E., Sultan, C. (1997) *Controllable tensegrity, a new class of smart structures*. Proceedings of the SPIE 4th Symposium on Smart Structures and Materials, 3039. pp. 166–177.
- Smith, D. A., Saldana, R. (1992) *Model of the Ca<sup>2+</sup> oscillator for shuttle streaming in Physarum polycephalum*. Biophysics journal. Vol. 61, pp. 368-380.
- Song, H., Poo, M. (2001) *The cell biology of neuronal navigation*. Nature Cell Biology. 3: E81-E88.
- Song, L., Nadkarni, S. M., Böderek, H. U., Beta, C., Bae, A., Frank, C., Rappel, W-J, Loomis, W. F., Bodenschatz, E. (2006) *Dictyostelium discoideum chemotaxis: Threshold for directed motion*. European Journal of Cell Biology. N° 85. pp. 981-989.
- Sourjik, V. (2004) *Receptor clustering and signal processing in E. coli chemotaxis*. Trends Microbiology, 12, 569-576.
- Sozinova, O., Jiang, Y., Kaiser, D., Alber, M. (2005) *A three-dimensional model of myxobacterial aggregation by contact-mediated interactions*. PNAS, 102 (32). pp. 11308-11312.
- Spetch M. L., Friedman, A. (2006) *Comparative cognition of object recognition*. Comparative Cognition & Behavior Reviews. Vol. 1, pp. 12-35

- Stahl, E. (1884) *Zur Biologie der Myxomyceten*. Botanische Zeitung, Jhrg. 42, pp. 146-155; 162-175; 187-191.
- Stamenovic, D. (2005) *Effects of cytoskeletal prestress on cell rheological behavior*. Acta Biomaterialia, 1, pp. 255-262.
- Stamenovic, D., Fredberg, J. J., Wang, N., Butler, J. P., Ingber, D. E. (1996) *A microstructural approach to cytoskeletal mechanics based on tensegrity*. Journal of Theoretical Biology, 181. pp. 125–136.
- Stechmann. A., Cavalier-Smith, T. (2003) *The root of the eukaryotic tree pinpointed*. Current of Biology. Vol. 13, pp. R665-R666.
- Steinbacher, S., Hof, P., Eichinger, L., Schleider, M., Gettermans, J., Vandekerckhove, J., Huber, R., Benz, J. (1999) *The crystal structure of the Physarum polycephalum actin-fragmin kinase: an atypical protein kinase with a specialized substrate-binding domain*. EMBO Journal, Vol. 18, Issue 11, pp. 2923-2929.
- Stenhouse, D. (1974) *The evolution of intelligence—a general theory and some of its implications*. George Allen and Unwin. London.
- Stewart, I. (1998) *El segundo secreto de la vida*. Editorial Crítica.
- Stewart, J. (1993) *Cognition without neurons. Adaptation, learning and memory in the immune system*. Cognitiva, Vol 5 (2), pp. 187-202.
- Stewart, J. (1995) *The implications for understanding high-level cognition of a grounding in elementary adaptive systems*. Robotics and Autonomous Systems N° 16, pp.107-116.
- Stewart, J. (1996) *Cognition = life. Implications for higher-level cognition*. Behavioural Processes, N° 35, pp.311–326.
- Stewart, J. (2001) *Radical Constructivism in Biology and Cognitive Science*. Foundations of Science, special issue on “The Impact of Radical Constructivism on Science”, edited by A. Riegler, 2001, Vol. 6, N° 1–3, pp. 99–124.
- Stock, A. M., Robinson, V. L., Goudreau, P. N. (2000) *Two-Component Signal Transduction*. Annual Review of Biochemistry, 69, pp. 183-215.
- Stock, J. B., Zhang S. (2013) *The biochemistry of memory*. Current Biology. Vol. 23, N° 17, pR741–R745.
- Stotz, K., Griffiths, P. E. (2008) *Biohumanities: Rethinking the relationship between biosciences, philosophy and history of science, and society*. Quarterly Review of Biology, 83(1), pp. 37-45.

Sultan, C., Stamenovic, D., Ingber, D. E. (2004) *A computational tensegrity model predicts dynamic rheological behaviors in living cells*. Annual Biomedical Eng, 32, pp. 520–30.

Takagi, S., Nishiura, Y., Nakagaki, T., Ueda, T., Ueda, K.-I.(2007) *Indecisive behavior of amoeba crossing an environmental barrier*. En: Kousuke, Y. et al (Ed.) (2007) *Topological Aspects of Critical systems and Networks*. Proceedings of the International Symposium. HUSCAP, Hokkaido University. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore. pp. 86-93.

Takamatsu, A., Fujii, T., Endo, I. (2000a) *Control of interaction strength in a network of the true slime mold by a microfabricated structure*. BioSystems, Vol. 55, pp. 33-38.

Takamatsu, A., Fujii, T., Yokota, H., Hosokawa, K., Higuchi, T., Endo, I. (2000b) *Controlling the geometry and the coupling strength of the oscillator system in plasmodio of Physarum polycephalum by microfabricated structure*. Protoplasma, Vol. 210, pp. 164-171.

Takamatsu, A., Fujii, T., Endo, I. (2000c) *Time Delay Effect in a Living Coupled Oscillator System with the Plasmodio of Physarum polycephalum*. Physical Review Letters, Vol. 85, No. 9, pp. 2026-2029.

Takamatsu, A., Tanaka, R., Yamada, H., Nakagaki, T., Fujii, T., Endo, I (2001) *Spatiotemporal Symmetry in Rings of Coupled Biological Oscillators of Physarum Plasmodial Slime Mold*. Physical Review Letters, Vol. 87, No. 7, 078102(1-4).

Takamatsu, A., Ito, M., Kagawa, Y. (2007) *Network Geometry of Plasmodial Slime Mold and Emergence of Biological Function*. 2007 Annual Report. “Emergence of Adaptive Motor Function through Interaction among the Body, Brain and Environment - A Constructive Approach to the Understanding of Mobiligence”. Project Leader: Hajime Asama (The University of Tokyo). pp. 161-164.

Takamatsu, A., Kagawa, Y., Ito, M., Okamoto, Yokotani, K., R., Gomi, T., Hirai, T., Endo, T., Arafune, S., Watanabe, S., Matsumoto, H., Tero, A., Nakagaki, T (2009) *Adaptation and emergence of biological function by environment-dependent-dynamical network in plasmodium of Physarum polycephalum*. Annual Report. “Emergence of Adaptive Motor Function through Interaction among the Body, Brain and Environment - A Constructive Approach to the Understanding of Mobiligence -” Project Leader: Hajime Asama (The University of Tokyo). pp. 169-173.

Takamatsu, A., Takaba, E., Takizawa, G. (2009) *Environment - dependent morphology in plasmodio of true slime mold Physarum Polycephalum*. Journal of Theoretical Biology. Vol. 256, pp. 29-44.

- Takamatsu, A., Takaba, E., Takizawa, G. (2009) *Environment-dependent morphology in plasmodio of true slime mold Physarum polycephalum and a network grow model*. Journal of Theoretical Biology, 256, pp. 29-44.
- Tal, R. et al. (1998) *Three cdg operons control cellular turnover of cyclic di-GMP in Acetobacter xylinum: genetic organization and occurrence of conserved domains in isoenzymes*. J. Bacteriol. 180, pp. 4416–4425.
- Tasaki, I., Kamiya, N. (1950) *Electrical response of a slime mold to mechanical and electrical stimuli*. Protoplasma, N° 39, pp. 333-343.
- Taylor, B. L. (2004). *An alternative strategy for adaptation in Bacterial Behavior*. Journal of Bacteriology. Vol. 186, pp. 3671– 3673.
- Taylor, B. L., Zhulin, I. B. (1998) *In search of higher energy: Metabolism-dependent behavior in bacteria*. Molecular Microbiology, 28, 683–690.
- Tazawa, M. (1999) *In Memorium: Noburô Kamiya*. Cell Structure and Function. Vol 24, pp. 55-57.
- Tero A., Kobayashi, R., Nakagaki, T. (2005) *A coupled-oscillator model with a conservation law for the rhythmic amoeboid movements of plasmodial slime molds*. Physica D 205, pp. 125-135
- Tero, A., Takagi, S., Saigusa, T., Ito, K., Bebber, D. P., Fricker, M. D., Yumiki, K., Kobayashi, R., Nakagaki, T. (2010) *Rules for Biologically Inspired Adaptive Network Design*. Science, Vol. 327. N°. 5964, January 22, 2010, pp. 439-42.
- Thom, R. (1977) *Stabilité structurelle et morphogénèse*. Inter Éditions S. A. Paris. En castellano: *Estabilidad estructural y morfogénesis*. 1997 Editorial Gedisa, Barcelona.
- Thom, R. (1990) *Esbozos de una semiofísica*. Ed. Gedisa. Barcelona.
- Tomas A, Kaltschmidt, C. (2014) *Bio-inspired Neural Networks*. En: Adamatzky, A. Chua. L. (eds) *Memristors Network*. Springer International Publishing Switzerland. pp. 151-172.
- Thompson, E., Stapleton, M. (2008) *Making Sense of Sense-Making. Reflections on Enactive and Extended Mind Theories*. Topoi, Vol 28, N°1, pp. 23-30.
- Thompson, R. F. (1986) *The Neurobiology of Learning and Memory*. Science, 233, n° 4767, pp. 941-947.
- Tieghem, M. P. H. van (1880) *Sur quelques Myxomycètes a plasmode agrégé*. Bulletin de la Société Botanique de France. Vol. 27. pp. 317-322.
- Tønnessen, M. (2001) *Outline of an Uexküillian bio-ontology*. Sign Systems Studies 29(2): 683–691.

Toussaint G. (1980) *The relative neighbourhood graph of a finite planar set*. Pattern Recognition. Vol. 12. pp. 261-8

Tsuda, S. Artmann, S., Zauner, K-P. (2009) *The Phi-Bot. A Robot Controlled by a Slime Mould*. En: A Adamatzky y M. Komosinski (eds) *Artificial Life Models in Hardware*. Cap. 10. Springer-Verlag London. 2009, pp 213-232.

Turró, R. (1912) *Orígens del Coneixement: La Fam.* Societat Catalana d'Edicions, Barcelona. (1980) Edicions 62 i "la Caixa" Col. Les millors obres de la literatura catalana. N° 32. Edición en castellano: *Orígenes del Conocimiento. El Hambre*. Ed. Minerva, Barcelona (1916).

Turró, R. (1918) *La Base Trófica de la Inteligencia*. Publicaciones de la Residencia de Estudiantes, Madrid. (2010) Editorial Triacastela, Madrid.

Ueda, M., Ogihara, S. (1994) *Microtubules are required in amoeba chemotaxis for preferential stabilization of appropriate pseudopods*. Journal of Cell Science N° 107, pp. 2071-2079.

Ueda, M., Kuroiwa, T., Matsunaga, S., Ogihara, S. (1999) *Microtubule-dependent migration of the cell nucleus toward a future leading edge in amoebae Physarum polycephalum*. Protoplasma, 211. pp. 172-182.

Ueda, T. (2005) *An intelligent slime mold: a self-organizing system of cell shape and information*. In: Ambuster, D. (editor) *Networks of Interacting Machines. Production Organization in Complex Industrial Systems and Biological Cells*. World Scientific Publishing Co. pp 221-255.

Ueda, T., Kobatake, Y. (1983) *Quantitative analysis of changes in cell shape of Amoeba proteus during locomotion and upon response to salt stimuli*. Experimental Cell Research. Vol. 147, pp. 466.

Ueda, T., Matsumoto, K., Akitaya, T., Kobatake, Y. (1986) *Spatial and temporal organization of intracellular adenosine nucleotide and cyclic nucleotides in relation to rhythmic motility in Physarum polycephalum*. Experimental Cell Research. Vol. 162, pp. 486-494,

Ueda, T., Nakagaki, T., Kobatake, Y. (1988) *Patterns in intracellular ATP distribution and rhythmic contraction in relation to amoeboid locomotion in the plasmodium of Physarum polycephalum*. Protoplasma Suppl. 1, pp. 51-56.

van Duijn, M. (2011) *The Biocognitive Spectrum. Biological Cognition as Variations on Sensorimotor Coordination*. Ph.D. Thesis. University of Groningen.

van Duijn, M., Keijzer, F., Franken, D. (2006) *Principles of minimal cognition: Casting cognition as sensorimotor coordination*. Adaptive Behavior, Vol. 14(2), pp.157-170.

- Varela, F. J. (1991) *Organism: A meshwork of Selfless Selves*. En: Tauber, A.I. ed.; *Organism and the origins of self*. Dordrecht: Kluwer.
- Varela, F. J. (1992) *Autopoiesis and a Biology of intentionality*. McMullin, B. and Murphy, N. (eds.) *Autopoiesis & Perception*. pp. 1–14.
- Varela, F. J. (1997) *Patterns of Life: Intertwining Identity and Cognition*. *Brain and Cognition*.Nº34, pp.72-87.
- Varela, F. J., Taylor Moran, D. (1971) *Microtubules and sensory transduction*. *Proceedings of National Academic of Sciences USA*.Vol. 68, Nº 4. pp. 757-760.
- Varela, F. J., Maturana, H. R., Uribe, R. (1974). *Autopoiesis: The organization of living systems, its characterization and a model*. *Biosystems* 5 187-196.
- Varela, F. J., Anspach, M. (1991) *Immuknowledge: the process of somatic individuation*. En: Thompson, W. I., ed.: *Gaia 2. Emergence, the new science of becoming*. Hudson, NY: Lindisfarne, S. pp. 68-85.
- Varela, F. J., Thompson, E., Rosch, E. (1991) *The Embodied Mind: Cognitive Science and Human Experience*. Cambridge, MA: The MIT Press. En español: *De cuerpo presente. Las ciencias cognitivas y la experiencia humana*. Editorial Gedisa (2005, 3ª reimpresión).
- Vasiev, B. N., Hogeweg, P., Panfilov, A. V. (1994) *Simulation of Dictyostelium discoideum aggregation via Reaction-Difussion model*. *Physical Review Letters*.Vol 73, Nº 23, pp 3173-3181.
- Vedral, V. (2010) *Decoding Reality the Universe as Quantum Information*. Oxford University Press, Oxford.
- Verworn, M. (1889) *Psycho-physiologische Protisten-Studien, Experimentelle Untersuchungen*. Verlag von Gustav Fischer, Jena.
- Verworn, M. (1913) *Irritability; a physiological analysis of the general effect of stimuli in living substance*. New Haven, Yale Univ. Press.
- Vicker, M. G. (2000) *Reaction–diffusion waves of actin filament polymerization / depolymerization in Dictyostelium pseudopodium extension and cell locomotion*. *Biophysical Chemistry*, Vol. 84, Nº2. pp. 87-98.
- Vicker, M. G. (2002) *F-actin assembly in Dictyostelium cell locomotion and shape oscillations propagates as a self-organized reaction–diffusion wave*. *FEBS Letters*, Vol.510 (1–2). pp. 5-9.
- Vimala Nair, R. (1994) *Periodic events and cell cycle regulation in the plasmodia of Physarum polycephalum*. *Journal of Biosciences*, Vo. 20, pp. 105-139.

Virgo, N. (2011) *Thermodynamics and the Structure of Living Systems*. Ph D. Thesis. University of Sussex, East Sussex.

von Baer, K. E. (1864) *Reden gehalten in wissenschaftlichen Versammlungen und kleinere Aufsätze vermischten Inhalts*. Schmitzdorff. St. Petersburg.

von Uexküll, J.. (1894) *Physiologische Untersuchungen an Eledone moschata. IV. Zur Analyse der Functionen des Centralnervensystems*. Zeitschrift für Biologie 31, 584-609.

von Uexküll, J. (1904a) *Studien über den Tonus II. Die Bewegungen der Schlangensterne*. Zeitschrift für Biologie 46: 1-37.

von Uexküll, J. (1904b) *Die ersten Ursachen des Rhythmus in der Tierreihe*. - Ergebnisse der Physiologie 3(2. Abt.): 1-11.

von Uexküll, J. (1905) *Leitfaden in das Studium der experimentellen Biologie der Wassertiere*. Wiesbaden: J.F.Bergmann

von Uexküll, J. (1907) *Die Umrise einer kommenden Weltanschauung. Die neue Rundschau* N° 18. Págs. 641-661.

von Uexküll, J. (1909) *Umwelt und Innenwelt der Tiere*. Berlin: J. Springer, 261.

von Uexküll, J. (1920 / 28) *Theoretische Biologie*. 1. Aufl. Berlin, Gbr. Paetel / 2.gänzl. neu bearb. Aufl. Berlin: J. Springer, 253. Traducción en ingles: (1926) *Theoretical Biology*. (Traducido por D. L. MacKinnon. International Library of Psychology, Philosophy and Scientific Method.) London: Kegan Paul, Trench, Trubner & Co. xvi+362.

von Uexküll, J. (1920) *Biologische Briefe an eine Dame*. Berlin: Verlag von Gebrüder Paetel, 130. Edición en castellano: *Cartas biológicas a una Dama*. Traducción de Manuel G. Morente. Revista de Occidente, Madrid 1945 (2ª ed.)

von Uexküll, J. (1920) *Staatsbiologie (Anatomie-Physiologie-Pathologie des Staates)*. Berlin: Verlag von Gebrüder Paetel.

von Uexküll, J. (1930) *Die Lebenslehre*. Potsdam: Müller und Kiepenheuer Verlag, und Zürich: Orell Füssli Verlag. En castellano: *“Teoría de la Vida”*, Editorial Svmma, Madrid 1944. Pág. 150.

von Uexküll, J. (1931) *Die Rolle des Subjekts in der Biologie*. Die Naturwissenschaften. Vol. 19, N° 19, pp 385-391.

von Uexküll, J. (1931) *Die Rolle des Subjekts in der Biologie*. Naturwissenschaften. 8. Mai 1931, Volume 19, Issue 19, pp 385-391.

von Uexküll, J. (1934) *Ideas para una concepción biológica del mundo*. Espasa-Calpe. Col. Biblioteca de Ideas del Siglo XX. Madrid.

von Uexküll, J. (1937) *Die neue Umwelthehre: Ein Bindeglied zwischen Natur- und Kulturwissenschaften*. Die Erziehung, Vol. 13, pp. 185–199.

von Uexküll, J. (1940) *Bedeutungslehre*. Leipzig: Verlag von J.A.Barth. En castellano: *Meditaciones Biológicas. Teoría de la Significación*. Traducción de José M. Sacristán. Revista de Occidente. Madrid, 1942.

von Uexküll, J. (1956) *Mondes animaux et monde humain et Théorie de la signification*. Éditions Denoël. Traducido del alemán por Phillippe Muller.

von Uexküll, J.; Kriszat, Georg (1934) [1956; 1970]. *Streifzüge durch die Umwelten von Tieren und Menschen: Ein Bilderbuch unsichtbarer Welten*. (Sammlung: Verständliche Wissenschaft, Bd. 21.) Berlin: J. Springer. [Desde 1956 se publicó junto a *Bedeutungslehre*.] Hamburg: Rowohlt.

Wadhams, G. H., Armitage, J. P. (2004) *Making sense of it all: bacterial chemotaxis*. Nature Reviews Molecular Cell Biology, Vol. 5(December 2004), pp. 1024-1037.

Wagensberg, J. (2011) *Raíces Triviales de lo Fundamental*. Tusquets Metatemas, 112, Barcelona.

Watanabe H, Mizunami M (2007) *Pavlov's Cockroach: Classical Conditioning of Salivation in an Insect*. PLoS ONE 2(6): e529. doi:10.1371/journal.pone.0000529.

Weber, A. (2001a) *Cognition as expression. The autopoietic foundations of anaesthetic theory of nature*. Sign System Studies Vol. 29 (1). pp. 153-168.

Weber, A. (2001b) *The 'surplus of meaning'. Biosemiotic aspects in Francisco J. Varela's philosophy of cognition*. Cybernetics & Human Knowing Vol. 9 (2). pp. 11-29.

Weber, A. (2001c) *Turning the inside out: natural forms as expression of intentionality*. SignSystems Studies Vol. 29 (1). pp. 153–168.

Weber, A. (2002a) *Feeling the signs. Organic experience, intrinsic teleology and the origins of meaning in the biological philosophy of Hans Jonas and Susanne K. Langer*.

Weber, A. (2002b) *Natur als Bedeutung. Versuch einer semiotischen Ästhetik des Lebendigen*. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin.

Weber, A. (2007) *Alles fühlt. Mensch, Natur und die Revolution der Lebenswissenschaften*. Berlin Verlag.

- Weber, A., Varela, F.J. (2002) *Life after Kant. Natural purposes and the autopoietic foundations of biological individuality*. Phenomenology and the Cognitive Sciences, N° 1. pp. 97-125.
- Weng, G., Bhalla, U., Iyengar, R. (1999) *Complexity in Biological Signaling Systems*. Science. Vol. 284 (02 April) pp. 92-96.
- Werner, E. (2010) *Meaning in a Quantum Universe*. Science, Vol. 329. no. 5992, pp. 629 – 630.
- Wheeler, M. (2005) *Reconstructing the cognitive world*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Wheeler, M. (2011) *Embodied Cognition and the Extended Mind*. En: Garvey, J. (ed.), *Companion to the Philosophy of Mind*, Continuum. London: Continuum. pp. 220–38.
- Wheeler, M (2014) *Revolution, reform, or business as usual? The future prospects for embodied cognition*. En: Shapiro, L. (ed.) *The Routledge Handbook of Embodied Cognition*. Routledge. Taylor & Francis Group. pp. 374-383.
- Whitehead, A. N. (1919). *An Enquiry concerning the Principles of Natural Knowledge*. Cambridge University Press. 2ª Ed. 1925
- Whiteside, G. M., Grzybowski, B. (2002) *Self-Assembly at All Scales*. Science Vol. 295, (29.03.2002). pp. 2418-2421.
- Whiting, J., de Lacy Costello, B. P., Adamatzky, A. (2014) *Towards slime mould chemical sensor: Mapping chemical inputs onto electrical potential dynamics of Physarum polycephalum*. Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 191. pp. 844-853.
- Wiener, N. (1965/1948) *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. New York: MIT Press and Wiley, 2ª edición (org. 1948).
- Wiener, N. (1988/1954) *The Human Use of Human Beings: Cybernetics and Society*. Da Capo Press Series in Science (Paperback), Perseus Book Group.
- Wilden, A. (1980) *System and structure: Essays in Communication and Exchange*. New York: Tavistock.
- Wille, J. J., Scheffey, C., Kauffman, S. A. (1977) *Novel behaviour of the mitotic clock in Physarum*. Journal of Cell Science. Vol. 27, pp. 91–104.
- Wills, T. J., et al. (2010) *Development of the Hippocampal Cognitive Map in Prewaning Rats*. Science, 328, pp. 1573-1576.
- Witten, Jr., T.A., Sander, L. M. (1981) *Diffusion - limited aggregation, a kinetic critical phenomenon*. Physics Review Letter. Vol. 47, pp. 1400–1403.

Witzany, G. (ed.) (2007) *Biosemiotics in Transdisciplinary Contexts*. Proceedings of the Gathering in Biosemiotics 6, UMWEB Publications, Finland.

Wohlfarth-Bottermann, K. E. (1974). *Plasmalemma invaginations as characteristic constituents of plasmodia of Physarum polycephalum*. Journal of Cell Science, Vol. 16, pp. 23-37.

Wohlfarth-Bottermann, K. E. (1977) *Cytoplasmatische Actomyosine und ihre Bedeutung für Zellbewegungen*. Westdeutscher Verlag.

Wohlfarth-Bottermann, K. E. (1979) *Oscillatory Contraction Activity in Physarum polycephalum*. Journal of experimental Biology. Vol. 81, pp 15-32.

Wohlfarth-Bottermann, K. E., Achenbach, U. (1980) *Oscillating Contractions in Protoplasmatic Strands Physarum. Mechanical and Thermal Methods of Phase Shifting for Studying the Nature of the Synchronizing Factor and its Transmission*. Journal of experimental Biology. Vol. 85, pp 21-31.

Wohlfarth-Bottermann, K. E., Shraideh, Z., Baranowski, Z. (1983) *Contractile and Structural Reactions to Impediments of  $Ca^{2+}$ - Homeostasis in Physarum polycephalum*. Cell Structure and Function N° 8, pp. 255-265.

Wright, L. (1973) *Functions*. The Philosophical Review, Vol. 82, No. 2, pp. 139-168.

Wright, L. (1976) *Teleological Explanations: An Etiological Analysis of Goals and Function*. University of California Press.

Wright, M., Albertini, C., Planques, V., Salles, I., Ducommun, B., Gely, C., Akhavan-Niaki, H., Mir, L., Moisand, A., Oustrin, M.-L. (1988) *Microtubule cytoskeleton and morphogenesis in the amoebae of the myxomycete Physarum polycephalum*. Biology of the Cell, Vol. 63, pp. 239-248.

Yamada, H., Nakagaki, T. Baker, R. E., Maini, P. K. (2007) *Dispersion relation in oscillatory reaction-diffusion systems with self-consistent flow in true slime mold*. Journal of Mathematical Biology, Vol. 54 (6), pp. 745-760.

Yi, T., Huang, Y., Simon, M. I., Doyle, J. (2000) *Robust perfect adaptation in bacterial chemotaxis through integral feedback control*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Vol. 97, pp. 4649–4653.

Yoshimoto Y., Kamiya, N. (1978) *Studies on contraction rhythm of the plasmodial strand I. Synchronization of local rhythms*. Protoplasma. Volume 95, Numbers 1-2, pp. 89-99.

Yoshimoto Y., Kamiya, N. (1978) *Studies on contraction rhythm of the plasmodial strand II. Effect of externally applied forces*. Protoplasma. Volume 95, Numbers 1-2, pp. 101-109.

Yoshimoto Y., Kamiya, N. (1978) *Studies on contraction rhythm of the plasmodial strand III. Role of endoplasmic streaming in synchronization of local rhythms.* Protoplasma. Volume 95, Numbers 1-2, pp. 111-121.

Yoshimoto Y., Kamiya, N. (1978) *Studies on contraction rhythm of the plasmodial strand IV. Site of active oscillation in an advancing plasmodio.* Protoplasma. Volume 95, Numbers 1-2, pp. 123-133.

Yoshimoto, Y., Sakai, T., Kamiya, N. (1981) *ATP Oscillation in Physarum Plasmodio.* Protoplasma. Vol. 109, pp. 159-168.

Yumura, S., Fukui, Y. (1998) *Spatiotemporal dynamics of actin concentration during cytokinesis and locomotion in Dictyostelium.* Journal of Cell Science, 111, pp, 2097–2108.

Yumura, S., Mori, H., Fukui, Y. (1984). *Localization of actin and myosin for the study of ameboid movement in Dictyostelium using improved immunofluorescence.* Journal of Cell Biology, 99, pp. 894–899.

Zhang, X., Adamatzky, A., Yang, X-S., Yang, H., Mahadevan, S., Deng, Y (2015) *A bio-inspired algorithm for identification of critical components in the transportation networks.* Applied Mathematics and Computation. Vol. 248, pp. 18-27.

Zhang, X., Adamatzky, A., Yang, X-S., Yang, H., Mahadevan, S., Deng, Y (2015) *A Physarum-inspired approach to supply chain network design.* Science China. Information Sciences, Vol. 58. pp. 1-14.

Zheleznaya, L. A., Gottberg, M. I., Hatano, S., Vazina, A. A. (1971) *Comparative investigation of the quaternary structure of muscle actin and myxomycete plasmodio actin.* Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Protein Structure, Vol. 251, N° 1, pp. 70-73.

Fig. 66. Árbol de la vida según Haeckel. *Generelle Morphologie der Organismen.* Berlin 1866..

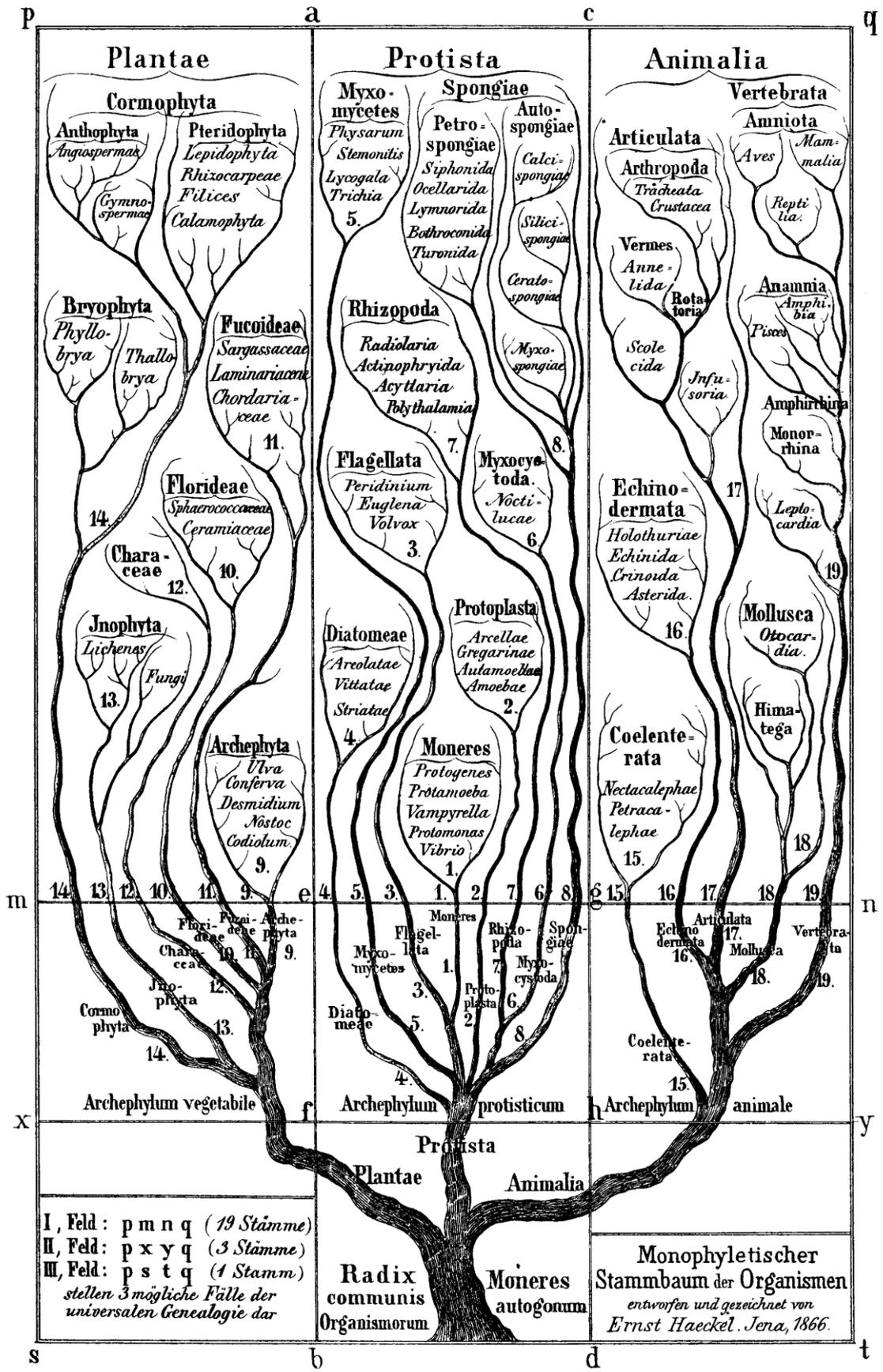


Fig.66